(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
10. August 2017 (10.08.2017)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2017/134028 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01S 7/40 (2006.01) *G01S 13/90* (2006.01)
G01S 13/87 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/051986

(22) Internationales Anmeldedatum:
31. Januar 2017 (31.01.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 101 898.8
3. Februar 2016 (03.02.2016) DE

(71) Anmelder: **DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.** [DE/DE]; Linder Höhe, 51147 Köln (DE).

(72) Erfinder: **REIMANN, Jens**; Geschwister-Scholl-Ring 4, 82110 Germering (DE). **DÖRING, Björn**; Haydnstr. 9, 82110 Germering (DE). **SCHWERDT, Marco**; Landsberger Str. 47a, 86938 Landsberg am Ammersee (DE). **RUDOLF, Daniel**; Landsberger Str. 229, 80687 München (DE). **RAAB, Sebastian**; Ludwig-Thoma-Str. 4, 82110 Germering (DE).

(74) Anwalt: **RÖSLER, Frank**; Rösler Rasch Van der Heide & Partner Patent- und Rechtsanwälte Partnerschaftsgesellschaft mbB, Bodenseestr. 18, 81241 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR CALIBRATING AN ACTIVE SENSOR SYSTEM

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR KALIBRIERUNG EINES AKTIVEN SENSORSYSTEMS

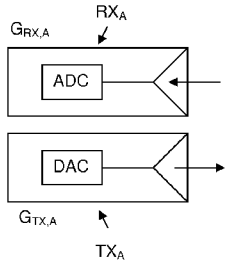


Fig. 1

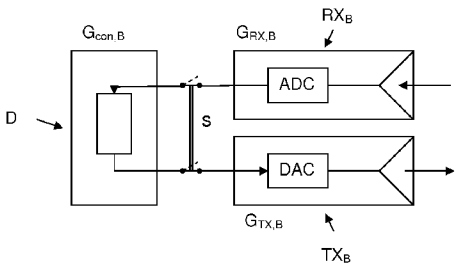


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a method for calibrating an active sensor system which comprises at least one active sensor A and one active sensor B. The term "active" indicates that the sensors A and B actively emit signals. The sensor A has a transmitter TX_A for emitting a signal S_{TXA} and a receiver RX_A for receiving a signal S RXA, wherein the receiver RX A and the transmitter TX_A operate independently of one another to the greatest possible extent in a radar mode of the sensor A. The sensor B has a transmitter TX_B, a receiver RX_B and a unit D which is used to connect the transmitter TX_B to the receiver RX_B in a transponder mode of the sensor B, with the result that a signal S_{RXB} received by the receiver RX_B is emitted again by the transmitter TX_B as a signal S_{TXB}. A gain $G_{con,B}$ between the received signal S_{RXB} and the signal S_{TXB} which is emitted again is predefined in this case. In a radar mode of the sensor B, the transmitter TX_B is not connected to the receiver RX_B, with the result that the transmitter TX_B and the receiver RX_B operate independently of one another. The emitted signals may be, for example, radar signals, light signals or acoustic signals. In this respect, the proposed method is suitable for calibrating radar systems, lidar systems or sonar systems, for example.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2017/134028 A1

SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines aktiven Sensorsystems, das zumindest einen aktiven Sensor A und einen aktiven Sensor B umfasst. Der Begriff „aktiv" deutet an, dass die Sensoren A und B aktiv Signale aussenden. Der Sensor A weist einen Sender TX_A zum Aussenden eines Signals S_{TXA} und einen Empfänger RX_A zum Empfangen eines Signals S RXA auf, wobei der Empfänger RX A und der Sender TX_A in einem RADAR-Modus des Sensors A weitestgehend unabhängig voneinander arbeiten. Der Sensor B weist einen Sender TX_B, einen Empfänger RX_B und eine Einheit D auf, mit der der Sender TX_B in einem Transpondermodus des Sensors B mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass ein von dem Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} vom Sender TX_B als Signal S_{TXB} wieder ausgesandt wird. Eine Verstärkung $G_{con, B}$ zwischen dem empfangenen Signal S_{RXB} und dem wieder ausgesandten Signal S_{TXB} ist dabei vorgegeben. In einem RADAR-Modus des Sensors B ist der Sender TX_B nicht mit dem Empfänger RX_B verbunden, so dass der Sender TX_B und der Empfänger RX_B unabhängig voneinander arbeiten. Die ausgesandten Signale können beispielsweise RADAR-Signale, Lichtsignale oder akustische Signale sein. Insofern eignet sich das vorgeschlagene Verfahren zur Kalibrierung beispielsweise von RADAR- Systemen, LIDAR-Systemen oder SONAR-Systemen.

Verfahren zur Kalibrierung eines aktiven Sensorsystems

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines aktiven Sensorsystems, das zumindest einen aktiven Sensor A und einen aktiven Sensor B umfasst. Der Begriff „aktiv“ deutet an, dass die Sensoren A und B aktiv Signale aussenden.

Der Sensor A weist einen Sender TX_A zum Aussenden eines Signals S_{TXA} und einen Empfänger RX_A zum Empfangen eines Signals S_{RXA} auf, wobei der Empfänger RX_A und der Sender TX_A in einem RADAR-Modus des Sensors A weitestgehend unabhängig voneinander arbeiten. Der Sensor B weist einen Sender TX_B, einen Empfänger RX_B und eine Einheit D auf, mit der der Sender TX_B in einem Transpondermodus des Sensors B mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass ein von dem Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} vom Sender TX_B als Signal S_{TXB} wieder ausgesandt wird. Eine Verstärkung $G_{con,B}$ zwischen dem empfangenen Signal S_{RXB} und dem wieder ausgesandten Signal S_{TXB} ist dabei vorgegeben. In einem RADAR-Modus des Sensors B ist der Sender TX_B nicht mit dem Empfänger RX_B verbunden, so dass der Sender TX_B und der Empfänger RX_B unabhängig voneinander arbeiten.

Die ausgesandten Signale können beispielsweise RADAR-Signale, Lichtsignale oder akustische Signale sein. Insofern eignet sich das vorgeschlagene Verfahren zur Kalibrierung beispielsweise von RADAR-Systemen, LIDAR-Systemen oder SONAR-Systemen.

Für die Kalibrierung von aktiven Sensorsystemen (beispielsweise satellitengestützte RADAR- oder SAR-Systeme, Flugzeugradare oder bodengestützte Radare) werden zur Zeit aktive und passive Referenzziele mit bekannten Rückstreueigenschaften verwendet.

So werden beispielsweise für die absolute Kalibrierung von RADAR-Systemen vornehmlich Winkelreflektoren (Winkelreflektoren), Metallkugeln und Metallplatten (passiv) als auch Transponder (aktiv) benutzt. Das Rückstreuverhalten kann für einfache passive Ziele näherungsweise berechnet werden. Für realistische, komplexe oder aktive Ziele muss das Rückstreuverhalten aufwendig messtechnisch bestimmt werden. Die dabei entstehenden Unsicherheiten der Messungen summieren sich auf und übertragen sich direkt auf die zu kalibrierenden aktiven Sensorsysteme. Die Kalibriergenauigkeit nimmt hierdurch ab.

Das Rückstreuverhalten der bisher zur Kalibrierung solcher aktiven Sensorsysteme verwendeten Referenzziele muss sehr genau bekannt sein. Hierfür wird das Rückstreuverhalten entweder messtechnisch erfasst, z.B. mit Hilfe eines kalibrierten Messgeräts bestimmt, wodurch die Unsicherheit im Vergleich zum Messgerät nochmals steigt (die kalibrierte Genauigkeit sinkt), oder durch Simulation bzw. andere analytische Methoden theoretisch bestimmt. Beide Varianten sind mit Fehlern behaftet, die sich auf die erreichbare Gesamtgenauigkeit der bisherigen Kalibrierungen auswirken. Die bisher bei der Kalibrierung solcher aktiver Sensorsysteme erfolgte Rückführung von Messwerten auf eine grundlegende SI-Größe führt zu entsprechend höheren Unsicherheiten. Die zurzeit verwendeten Referenzziele sind aufgrund ihrer benötigten Größe und/oder Fertigungsgenauigkeit teuer und beschränken durch ihre Fertigungstoleranzen die Kalibriergenauigkeit des gesamten Sensorsystems.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes kalibriertes Verfahren anzugeben, welches die vorstehend genannten Nachteile zumindest verringert.

Die Erfindung ergibt sich aus den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche. Weitere Merkmale, Anwendungsmöglichkeiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, sowie der Erläuterung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, die in den Figuren dargestellt sind.

Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zur (absoluten) Kalibrierung eines Sensorssystems, das zumindest einen Sensor A und einen Sensor B umfasst, wobei der Sensor A einen Sender TX_A zum Aussenden eines Signals S_{TXA} und einen Empfänger RX_A zum Empfangen eines Signals S_{RXA} aufweist, wobei der Empfänger RX_A und der Sender TX_A in einem RADAR-Modus des Sensors A unabhängig voneinander arbeiten, der Sensor B einen Sender TX_B, einen Empfänger RX_B und eine Einheit D aufweist, mit der der Sender TX_B in einem Transpondermodus des Sensors B mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass ein von dem Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} vom Sender TX_B als Signal S_{TXB} wieder ausgesandt wird, wobei eine Verstärkung $G_{con,B}$ zwischen dem empfangenen Signal S_{RXB} und dem wieder ausgesandten Signal S_{TXB} vorgegeben ist, und in einem RADAR-Modus des Sensors B der Sender TX_B nicht mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass der Sender TX_B und der Empfänger RX_B unabhängig voneinander arbeiten, ein Objekt C vorhanden ist, das ein auftreffendes

Signal aktiv oder passiv zurücksendet, und der Abstand R_{AB} zwischen dem Sensor A und dem Sensor B, der Abstand R_{AC} zwischen dem Sensor A und dem Objekt C und der Abstand R_{BC} zwischen dem Sensor B und dem Objekt C bekannt ist.

Das vorgeschlagene Verfahren umfasst folgende Schritte.

In einem ersten Schritt erfolgt ein Aussenden eines Signals $S_{TX_i,C}$ durch den Sender TX_i mit einer Sendeleistung $P_{TX_i,C}$ zu dem Objekt C und ein Erfassen des daraufhin vom Objekt C ausgesandten oder reflektierten Signals $S_{RX_i,C}$ durch den Empfänger RX_i mit der Empfangsleistung $P_{RX_i,C}$ für i ϵ {A, B}, zur Ermittlung der Verhältnisse:

$$PV_{AC} = \frac{P_{RX_A,C}}{P_{TX_A,C}} \text{ und } PV_{BC} = \frac{P_{RX_B,C}}{P_{TX_B,C}}$$

wobei gilt:

$$PV_{AC} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{AC}}\right)^4 \cdot (G_{RX,A} \cdot G_{TX,A}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right) = 10^{\frac{P_{AC}}{10}}$$

$$PV_{BC} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{BC}}\right)^4 \cdot (G_{RX,B} \cdot G_{TX,B}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right) = 10^{\frac{P_{BC}}{10}}$$

mit:

$(G_{RX,i} \cdot G_{TX,i})$:= zu bestimmender Hardware-Gewinn des Sensors i für i ϵ {A, B},

λ := Wellenlänge,

$\left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right)$:= äquivalenter Gewinn des Objekts C,

σ_C := Radarrückstreuquerschnitt des Objekts C.

In einem zweiten Schritt erfolgt ein Aussenden eines Signals $S_{TX_A,B}$ durch den Sender TX_A mit einer Sendeleistung $P_{TX_A,B}$ zu dem Sensor B, der in dem Transpondermodus mit der Verstärkung $G_{con,B}$ betrieben wird, und ein Erfassen des daraufhin vom Sensor B ausgesandten Signals als $S_{RX_A,B}$ durch den Empfänger RX_A mit der Empfangsleistung

$P_{RX_A,B}$ zur Ermittlung des Verhältnisses:

$$\frac{P_{RX_A,B}}{P_{TX_A,B}} = PV_{AB}$$

wobei gilt:

$$PV_{AB} = \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R_{AB}}\right)^4 \cdot G_{con,B}\right) \cdot (G_{RX,B} \cdot G_{TX,B}) \cdot (G_{RX,A} \cdot G_{TX,A}) = 10^{\frac{P_{AB}}{10}}.$$

In einem dritten Schritt erfolgt ein Ermitteln von Kalbrierfaktoren $F_{cal,i}$ basierend oder zurückführbar auf folgendem Zusammenhang:

$$\begin{pmatrix} F_{cal,A} \\ F_{cal,B} \\ G_C \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} P_{AB} - C_{AB} \\ P_{AC} - C_{AC} \\ P_{BC} - C_{BC} \end{pmatrix}$$

mit:

$F_{cal,i} = 10 \cdot \log(G_{RX,i} \cdot G_{TX,i} \cdot F_{scale,i})$ für i ϵ {A, B},

$$G_C = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right)$$

$F_{scale,i}$:= Skalierungsfaktor

C_{AB}, C_{AC}, C_{BC} := von λ und den Abständen R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} abhängige Konstanten.

In einem vierten Schritt erfolgt ein Kalibrieren der Sensoren A und/oder B mit den Kalibrierfaktoren $F_{cal,i}$.

Der erste und der zweite Schritt können gleichzeitig oder in umgedrehter Zeitreihenfolge durchgeführt werden.

Typischer Weise arbeiten die Sender TX_A, TX_B und die Empfänger RX_A, RX_B in einem vorgegebenen Wellenlängenband bzw. Frequenzband und nicht exakt bei einer einzigen Wellenlänge λ. Das angegebene Verfahren kann hierzu derart abgeändert werden, dass die in den vorstehenden Formen angegebene Wellenlänge λ jeweils einem Integral über

alle Frequenzen eines von dem jeweiligen Sender TX_i, mit i ϵ {A, B}, ausgesandten bandlimitierten Signal entspricht.

Vorteilhaft umfasst der Sender TX_B einen Digital-zu-Analog-Konverter (DAC = engl. „digital-analog-converter“) und eine Sendeantenne, der Empfänger RX_B einen Analog-zu-Digital-Konverter (ADC = „analog-digital-converter“) und eine Empfangsantenne, und die Einheit D eine Einheit zur digitalen Signalverarbeitung, die im Transpondermodus den Sender TX_B mit dem Empfänger RX_B zur Datenkommunikation verbindet.

Die Einheit D kann beispielsweise einen Signalverstärker, ein Zeitverzögerungsglied, ein Signalformungsglied, etc. umfassen, wobei die in der Einheit D bewirkte Änderung des Signals bekannt und deterministisch ist. Vorteilhaft werden die vom Empfänger RX_B im Transpondermodus empfangenen Signale von der Einheit D verstärkt und/oder gefiltert und/oder zeitverzögert, bevor diese an den Sender TX_B weitergeleitet werden.

Der Sensor A und der Sensor B sind vorteilhaft RADAR-Sensoren (RADAR = engl. „radio detection and ranging“ oder SONAR-Sensoren oder LIDAR-Sensoren (SONAR = engl. „sound navigation and ranging“; LIDAR = engl. „light detection and ranging“).

Vorteilhaft genügen die Abstände R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} folgender Bedingung:

$$R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} > (2*D^2)/\lambda$$

mit

D: Antennendurchmesser der jeweiligen Sendeantenne

λ: Wellenlänge des Signals S

In einer vorteilhaften Weiterbildung des vorgeschlagenen Verfahrens werden die Schritte 1 bis 3. q-fach wiederholt ausgeführt, mit q = 1, 2, 3, …, wobei die Kalibrierfaktoren $F_{cal,i}$ als Mittelwerte $< F_{cal,i} >_q$ ermittelt werden (i ϵ {A, B}). Natürlich sind andere Mittelungsverfahren ebenfalls vom Erfindungsgedanken umfasst. Die Mittelung führt zu einer Verbesserung der Kalibriergenauigkeit.

In einem typischen Anwendungsbeispiel des vorgeschlagenen Kalibrierverfahrens ist der Sensor A ein satellitengetragenes RADAR-System, der Sensor B ein RADAR-Transponder, und das Objekt C ein Winkelreflektor. Dabei kann der Sensor B ebenfalls ein satellitengetragenes RADAR-System sein.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein System umfassend einen Sensor A, einen Sensor B und ein mit den beiden Sensoren A, B verbundenes Steuer- und Auswertesystem, wobei das Steuer- und Auswertesystem zur Durchführung eines Verfahrens, wie vorstehend ausgeführt, eingerichtet und ausgeführt ist.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Computersystem, mit einer Datenverarbeitungsvorrichtung, wobei die Datenverarbeitungsvorrichtung derart ausgestaltet ist, dass ein Verfahren, wie vorstehend ausgeführt, auf der Datenverarbeitungsvorrichtung ausgeführt wird.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein digitales Speichermedium mit elektronisch auslesbaren Steuersignalen, wobei die Steuersignale so mit einem programmierbaren Computersystem zusammenwirken können, dass ein Verfahren, wie vorstehend beschrieben, ausgeführt wird.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Computer-Programm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode zur Durchführung des Verfahrens, wie vorstehend ausgeführt, wenn der Programmcode auf einer Datenverarbeitungsvorrichtung ausgeführt wird.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Computer-Programm mit Programmcodes zur Durchführung des Verfahrens, wie vorstehend ausgeführt, wenn das Programm auf einer Datenverarbeitungsvorrichtung abläuft. Dazu kann die Datenverarbeitungsvorrichtung als ein beliebiges aus dem Stand der Technik bekanntes Computersystem ausgestaltet sein.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der – gegebenenfalls unter Bezug auf die Zeichnungen – zumindest ein Ausführungsbeispiel im Einzelnen beschrieben ist. Gleiche, ähnliche und/oder funktionsgleiche Teile sind mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Es zeigen:

Fig. 1	ein schematisiertes Blockschaltbild des Sensors A,
Fig. 2	ein schematisiertes Blockschaltbild des Sensors B, und
Fig. 3	einen schematisierten Verfahrensablauf des vorgeschlagenen

Kalibrierverfahrens.

Die Erfindung beschreibt ein Verfahren zur Kalibrierung eines Radarsystems, dass entweder stationär auf dem Erdboden oder instationär in der Atmosphäre oder im Weltraum betrieben wird. Instationär betriebene Radarsysteme sind häufig als sogenanntes „Synthetic Aperture Radar (SAR)“ ausgeführt und werden häufig zu Zwecken der Erderkundung eingesetzt. Die Kalibrierung eines derart komplexen Radarsystems, das häufig auf sogenannten „Active Phased Array“- Antennen basiert und konsequenterweise eine Vielzahl von unterschiedlichen Betriebsmodi aufweist, ist sehr komplex und kostenintensiv.

Das Kalibrieren eines Messinstruments bzw. eines Sensors bedeutet eine Verbindung zu erzeugen zwischen Messwerten zu einem oder mehreren fundamentalen physikalischen Größen zum anderen. Es gibt nur sieben solcher fundamentalen physikalischen Größen im sogenannten SI Einheitensystem. Alle anderen physikalischen Größen werden daraus abgeleitet.

Das vorgeschlagene Verfahren zur Kalibrierung eines Radarsystems ermöglicht die direkte Kalibrierung des absoluten Systemgewinns des gesamten Radarsystems, ohne ein speziell zugeordnetes radiometrisches Kalibriernormal zu verwenden. Die Kalibrierfaktoren (die Verbindung zwischen gemessenen Werten und physikalischen Einheiten) des Radarsystems werden direkt durch Vergleich von zumindest drei Einheiten (davon zwei Sensoren) mit spezifischen Eigenschaften ermittelt.

Zumindest einer der Sensoren (Sensor A) weist einen Sender TX_A zum Aussenden eines Signals S_{TXA} und einen Empfänger RX_A zum Empfangen eines Signals S_{RXA} auf, wobei der Empfänger RX_A und der Sender TX_A in einem RADAR-Modus des Sensors A unabhängig voneinander arbeiten. Sensor A stellt mithin einen typischen Sensor, der nach dem Radarprinzip arbeitet, dar. **Fig. 1** zeigt hierzu ein Blockschaltbild. Der Empfänger RX_A weist einen Analog-Digital Wandler (ADC) auf. Der Sender TX_A weist einen Digital-Analog-Wandler (DAC) auf. Das gesendete Signal S_{TXA} ist im RADAR-Modus unabhängig von einem empfangenen Signal S_{RXA}.

Fig. 2 zeigt ein Blockschaltbild des Sensors B. Der zweite Sensor (Sensor B) weist einen Sender TX_B, einen Empfänger RX_B und eine Einheit D auf, mit der der Sender TX_B in einem Transpondermodus des Sensors B mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass

ein von dem Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} vom Sender TX_B als Signal S_{TXB} wieder ausgesandt wird, wobei eine Verstärkung $G_{con,B}$ zwischen dem empfangenen Signal S_{RXB} und dem wieder ausgesandten Signal S_{TXB} vorgegeben ist, und mit der der Sender TX_B in einem RADAR-Modus des Sensors B nicht mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass der Sender TX_B und der Empfänger RX_B unabhängig voneinander arbeiten. Die Umschaltung von Transpondermodus und RADAR-Modus erfolgt durch den Schalter S. In der dargestellten Form ist der Sensor B in den RADAR-Modus geschaltet. Der Sensor B kann mithin sowohl nach dem Transponderprinzip als auch nach dem Radarprinzip arbeiten. Im Transpondermodus (Schalter S geschlossen) wird ein vom Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} durch den Analog-Digital-Wandler in digitale Signale verwandelt und an die Einheit D weitergeleitet. Die Einheit D ermöglicht die Modifikation des digitalen Signals in einer vorgegebenen Weise (beispielsweise durch eine vorgegebene Zeitverzögerung, durch eine vorgegebene Verstärkung, vorgegebene Verformung etc.). Von der Einheit D wird das gegebenenfalls modifizierte digitale Signal an den Sender TX_B übermittelt und dort von einem Digital-Analog-Wandler (DAC) in ein analoges Signal gewandelt, das über die Senderantenne abgestrahlt wird.

Im RADAR-Modus des Sensors B wird ein Signal S_{TXB} generiert und über die Antenne des Sender TX_B abgestrahlt. Das zurückreflektierte oder zurückgesendete Signal wird von der Antenne des Empfängers RX_B erfasst. Der Schalter S ist in diesem Fall offen. sodass die Einheit D in diesem Fall nicht involviert ist. Vorteilhaft ist die Einheit D eine digitale Einheit deren Verhalten und Eigenarten exakt bekannt sind.

Für das vorgeschlagene Kalibrierverfahren sind folgende Voraussetzungen erforderlich:

1. der Sensor A ist eingerichtet und ausgeführt zur Erfassung der Rückstreueigenschaften von zumindest zwei weiteren Objekten T_n ($n = 1, 2, \ldots, N$ und $N > 2$,
2. eines dieser weiteren Objekte ist der Sensor B, der zumindest die Rückstreueigenschaften eines der anderen Objekte T_n erfassen kann, der Sensor B muss sowohl in einem Transpondermodus als auch in einem RADAR-Modus arbeiten können.

Das vorgeschlagene Kalibrierverfahren wird am Beispiel von einem RADAR-Sensorsystem erläutert, es kann jedoch jedes andere aktive Sensorsystem (beispielsweise ein SONAR-System oder ein LIDAR-System) genutzt werden, sofern dieses die vorstehend genannten Voraussetzungen erfüllt.

Nachfolgend wird ein fundamentales Gleichungssystem beschrieben, von dem ausgehend ein Satz linearer Gleichungen abgeleitet und gelöst werden kann. Abhängig von den Eigenschaften der zu kalibrierenden Objekte ergeben sich leichte Unterschiede bei den Gleichungen.

Die Rückstreueigenschaften eines Objekts können durch den sogenannten Radarrückstreuquerschnitt (engl. „radar cross section“, RCS) beschrieben werden. Der Radarrückstreuquerschnitt σ_m eines Transponders m, der einen Empfänger mit einem Empfängergewinn $G_{RX,m}$, einen Sender mit einem Sendergewinn $G_{TX,m}$, und einen Gewinn der Einheit D_m $G_{con,m}$ aufweist, kann wie folgt definiert werden:

$$\sigma_m = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_m = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_{RX,m} \cdot G_{TX,m} \cdot G_{con,m} \quad (1)$$

wobei λ die Wellenlänge bezeichnet, mit der das System betrieben wird.

Erfassung von Zielen mit einem Radarsystem

Aktive Ziele (Fall 1)

Unter Verwendung der Radargrundgleichung für Punktziele ergibt sich für das Verhältnis von empfangener zu gesendeter Leistung eines Sensors n, der das Ziel T_m erfasst:

$$\left.\frac{P_{Rx,n}}{P_{Tx,n}}\right|_{T_m} = G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sigma_m \quad (2)$$

$P_{Rx,n}$ definiert die empfangene Leistung und $P_{Tx,n}$ die ausgesandte Leistung des Radarsensors n, $G_{Rx,n}$ den Gewinn des Empfängers und $G_{Tx,n}$ den Gewinn des Senders, und R die Einwegdistanz vom Sensor n zum Ziel T_m. Die Notation $|_{T_m}$ gibt die Vermessung des Ziels T_m an. Das messende System wird durch n repräsentiert.

Setzt man Gleichung (1) in Gleichung (2) ein, dann erhält man:

$$\left.\frac{P_{Rx,n}}{P_{Tx,n}}\right|_{T_m} = \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 \cdot G_{con,m}\right) \cdot (G_{RX,m} \cdot G_{Tx,m}) \cdot (G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n}) \quad (3)$$

Dabei ist der erste Term der rechten Seite $\left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 \cdot G_{con,m}\right)$ (Fall 1) bekannt, während das Produkt $(G_{RX,m} \cdot G_{Tx,m}) \cdot (G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n})$ zu bestimmen ist.

Logarithmiert ergibt Gleichung (3)

(4) $$P_n\big|_{T_m} = C_{nm,1} + G_{n,S} + G_{m,S}$$

wobei sich für $C_{nm,1}$ ergibt:

(5) $$C_{nm,1} = 10\log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 + 10\log\left(G_{con,m}\right)$$

und wobei der Systemgewinn wie folgt ermittelt werden muss:

(6) $$G_{n,S} = 10\log\left(G_{Rx,n} \cdot G_{Tx,n}\right)$$

(7) $$G_{m,S} = 10\log\left(G_{Rx,m} \cdot G_{Tx,m}\right)$$

Passive Ziele (Fall 2)

Die RADAR-Gleichung (2) muss hierzu wie folgt erweitert werden:

(8) $$\left.\frac{P_{Rx,n}}{P_{Tx,n}}\right|_{T_m} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 \cdot (G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_m}{\lambda^2}\right)$$

Logarithmiert ergibt Gleichung (8)

(9) $$P_n\big|_{T_m} = C_{nm,2} + G_{n,S} + G_{m,P}$$

wobei $C_{nm,1}$ bekannt ist:

(10) $$C_{nm,2} = 10\log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4$$

und wobei der Systemgewinn wie folgt ermittelt werden muss:

(11) $$G_{n,S} = 10\log\left(G_{Rx,n} \cdot G_{Tx,n}\right)$$

(12) $$G_{m,P} = 10\log\left(\frac{4\pi\sigma_m}{\lambda^2}\right)$$

Dabei ist $G_{m,P}$ ein Gewinn, der proportional zum RADAR-Rückstreuquerschnitt des Ziels m ist.

Erfassung von Zielen mit einem bildgebenden Radar (Fall 3)

Der Radarrückstreuquerschnitt eine Ziels, das von einem bildgebenden Radar erfasst wird, kann innerhalb eines Bildes, welches gegebenenfalls durch eine Prozessierung der aufgenommenen Messdaten erzeugt wurde, durch die integrierte Pixelintensität unter Zuhilfenahme eines Kalibrierungsfaktors beschrieben werden, (unterstellt ist ein linear zeitinvariantes System).

Das Leistungsverhältnis $\left.\frac{P_{Rx,n}}{P_{Tx,n}}\right|_{T_m}$ von Gleichung (3) kann ersetzt werden durch eine Bildintensität I_n und einen Skalierungsfaktor $F_{scale,n}$. Wird dieser Ansatz verwendet, kann ein kombinierter Kalibrierfaktor ermittelt werden, der die Bildintensitäten direkt in Rückstreuquerschnitte konvertiert.

Aktive Ziele (Fall 3)

Gleichung (3) zur Radarerfassung eines aktiven Ziels ergibt:

(13) $$I_n\big|_{T_m} = \left.\frac{P_{Rx,n}}{P_{Tx,n}}\right|_{T_m} \cdot F_{scale,n} = \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 \cdot G_{con,m}\right) \cdot (G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n} \cdot F_{scale,n}) \cdot (G_{RX,m} \cdot G_{Tx,m})$$

(14) $$I_n\big|_{T_m} = \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 \cdot G_{con,m}\right) \cdot F_{cal,n} \cdot (G_{RX,m} \cdot G_{Tx,m})$$

wobei $(G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n} \cdot F_{scale,n}) = F_{cal,n}$ ein neuer kombinierter Kalibrierfaktor ist, der für das System bestimmt werden soll. Dieser Kalibrierfaktor umfasst auch jedweden Gewinn, der sich bei der Bilderzeugung (beispielsweise bei der SAR Fokusierung) ergibt.

Passive Ziele (Fall 4)

Die vorstehend beschriebene Skalierung kann auf die Gleichung (8) angewendet werden:

(15) $$I_n\big|_{T_m} = \frac{P_{Rx,n}}{P_{Tx,n}}\bigg|_{T_m} \cdot F_{scale,n} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 \cdot (G_{RX,n} \cdot G_{Tx,n} \cdot F_{scale,n}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_m}{\lambda^2}\right)$$

Die Gleichungen (14) und (15) ergeben in logarithmischer Formulierung ein lineares Gleichungssystem.

Abhängig von dem zu kalibrierenden System werden die Gleichungen (3), (8), (14) und (15) in logarithmischer Darstellung verwendet, um ein lineares Gleichungssystem zu formen.

Wird beispielsweise unterstellt, dass ein Sensor A, der im RADAR-Modus arbeitet, einen Sensor B, der im Transponder-Modus arbeitet und einen Winkelreflektor C vermisst, dann können die vom Sensor A erfassten Verhältnisse der gesendeten und empfangenen Leistungen $P_A\big|_{T_B}$ und $P_A\big|_{T_C}$ ermittelt werden. In einem weiteren Schritt vermisst der Sensor B, der nun im RADAR-Modus arbeitet, den Winkelreflektor C. Daraus kann das Leistungsverhältnis $P_B\big|_{T_C}$ ermittelt werden.

Auf Basis der logarithmischen Version von Gleichung (3) kann folgendes System linearer Gleichungen formuliert werden:

(16) $$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G_{A,S} \\ G_{B,S} \\ G_{C,P} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_A\big|_{T_B} \\ P_A\big|_{T_C} \\ P_B\big|_{T_C} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C_{AB,1} \\ C_{AC,2} \\ C_{BC,2} \end{pmatrix}$$

Die konstanten Therme $C_{x,y}$ sind in den Gleichungen (5) und (10) definiert. Die Systemgewinne $G_{x'}$ ergeben sich aus den Gleichungen (6), (7), (11) und (12).

Das Lösen des Gleichungssystems erfolgt durch Invertierung der Matrizen:

$$(17)\quad \begin{pmatrix} G_{A,S} \\ G_{B,S} \\ G_{C,P} \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_A|_{T_B} & - & C_{AB,1} \\ P_A|_{T_C} & - & C_{AC,2} \\ P_B|_{T_C} & - & C_{BC,2} \end{pmatrix}$$

Durch das Lösen dieser Gleichung ergeben sich der Systemgewinn $G_{A,S}$ des Sensors A, der Systemgewinn $G_{B,S}$ des Sensors B, sowie der äquivalente Gewinn $G_{C,P}$ des Ziels C.

Aus den Gleichungen (5) und (10) ergibt sich, dass beispielsweise zur Kalibrierung eines SAR Systems lediglich die gemessenen Leistungsverhältnisse, die KalibrierWellenlänge λ der Messfrequenz und die Entfernung R bekannt sein müssen. Für große Entfernungen, beispielsweise im Fall von satellitengetragenen SAR-Systemen, ist das vorgeschlagene Kalibrierverfahren wenig fehleranfällig in Bezug auf konstante Offset-Fehler der Messungen.

Obwohl die vorstehend angegebenen Gleichungen von einer Kalibrierwellenlänge λ ausgehen, können sie einfach auf bandlimitierte Signale übertragen werden, wobei ein Integral über alle Frequenzen verwendet wird.

Die vorstehenden Ausführungen werden nachfolgend an einem Beispiel nochmals näher erläutert. Das Beispiel betrifft die Kalibrierung eines satellitengetragenen SAR-Systems (Sensor A) unter Verwendung eines Winkelreflektors (Ziel C) und eines Radars/Transponders (Sensor B).

Im Gegensatz zu den üblicherweise verwendeten Kalibrierverfahren eines satellitengetragen SAR-Systems, bei dem eine bekannte Kalibrierung eines auf der Erdoberfläche angeordneten Ziels auf den Satelliten übertragen wird, ist es mit dem vorgeschlagenen Verfahren möglich, das SAR-System auf dem Satelliten und die Ziele in einem Schritt zu kalibrieren, d.h. die Notwendigkeit ein Bodenziel vorab zu kalibrieren entfällt. Das satellitengetragene SAR-System sei der Sensor A, der im RADAR-Modus betrieben wird. Weiterhin sei ein Sensor B vorhanden, der sowohl im Transpondermodus als auch im RADAR-Modus betrieben werden kann. Weiterhin ist an der Erdoberfläche ein Ziel C angeordnet, dass ein Winkelreflektor ist.

Die absolute radiometrische Kalibrierung des satellitengetragenen SAR-Systems (Sensor A) ergibt sich aus drei relativen Messungen von Leistungsverhältnissen, den bekannten

Entfernungen zwischen den Sensoren A und B und dem Sensor B und dem Ziel C, sowie der Wellenlänge/Frequenz der Sender der Sensoren A und B.

Der Sensor B ist in diesem Beispiel ebenfalls ein satellitengetragener Sensor. Zunächst ermittelt der Sensor A das Leistungsverhältnis bei der Abtastung des Ziels C und das Leistungsverhältnis bei der Abtastung des Sensors B, wobei der Sensor B im Transpondermodus arbeitet. Unabhängig davon ermittelt der Sensor B das Leistungsverhältnis bei der Abtastung des passiven Ziels C.

Unter Verwendung der logarithmischen Version der drei Gleichungen (8), (14) und (15) ergibt sich folgendes Gleichungssystem (bei dem zur Vereinfachung die Indikation des erfassten Ziels $X|_{T_m}$ nicht angegeben ist).

(18) $$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{cal,A} \\ G_{B.S} \\ G_{C,S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{AB} \\ I_{AC} \\ P_{BC} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C_{AB,1} \\ C_{AC,2} \\ C_{BC,2} \end{pmatrix}$$

Hierbei sind I_{AB} und I_{AC} die gemessenen Bildintensitäten (bei SAR nach der Fokusierung) des Sensors A für die Ziele: Sensor B und Winkelreflektor C. P_{BC} ist das Leistungsverhältnis, das vom Transponder B bei der Abtastung des Winkelreflektors C ermittelt wurde. $F_{cal,A}$ ist der zu ermittelnde Kalibrierfaktor, der RCS Werte direkt in Bildintensitäten wandelt (vergleiche hierzu Gleichung (14)). $G_{C,P}$ ist der rückstreuquerschnittsäquivalente Gewinn des Winkelreflektor und $G_{B,S}$ ist der Systemgewinn des Transponders (Sensor B). Der konstante Teil der drei Gleichungen ergibt sich zu:

(19) $$C_{AB,1} = 10\log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 + 10\log\left(G_{con,B}\right)$$

(20) $$C_{AC,2} = 10\log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4$$

(21) $$C_{BC,2} = 10\log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4$$

Nach der Invertierung des Systems ergibt sich:

$$(22)\quad \begin{pmatrix} F_{cal,A} \\ F_{B,S} \\ G_{C,P} \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} I_{AB} - C_{AB,1} \\ I_{AC} - C_{AC,2} \\ I_{BC} - C_{BC,2} \end{pmatrix}$$

Der rückstreuquerschnittsäquivalente Gewinn $G_{C,P}$ des passiven Ziels C ist für die Kalibrierung des Radarsystems nicht explizit erforderlich, kann aber von Interesse sein, um ihn zu einem Rückstreuquerschnitt (RCS) des Winkelreflektors C zurückzukonvertieren (vergleiche Gleichung (12)). Hiermit wird sofort auch das Ziel C absolut kalibriert.

Das vorgeschlagene Verfahren zur Kalibrierung eines Sensorsystems ermöglicht eine höhere Kalibriergenauigkeit aufgrund weniger relevanter Ungenauigkeitsquellen, die Möglichkeit Ausbreitungseffekte zu kompensieren, und ein Verzicht auf vorab kalibrierte Referenzziele.

Fig. 3 zeigt einen schematisierten Ablauf des vorgeschlagenen Verfahrens zur Kalibrierung eines Sensorssystems, das zumindest einen Sensor A und einen Sensor B umfasst, wobei der Sensor A einen Sender TX_A zum Aussenden eines Signals S_{TXA} und einen Empfänger RX_A zum Empfangen eines Signals S_{RXA} aufweist, wobei der Empfänger RX_A und der Sender TX_A in einem RADAR-Modus des Sensors A unabhängig voneinander arbeiten, der Sensor B einen Sender TX_B, einen Empfänger RX_B und eine Einheit D aufweist, mit der der Sender TX_B in einem Transpondermodus des Sensors B mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass ein von dem Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} vom Sender TX_B als Signal S_{TXB} wieder ausgesandt wird, wobei eine Verstärkung $G_{con,B}$ zwischen dem empfangenen Signal S_{RXB} und dem wieder ausgesandten Signal S_{TXB} vorgegeben ist, und mit der der Sender TX_B in einem RADAR-Modus des Sensors B nicht mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass der Sender TX_B und der Empfänger RX_B unabhängig voneinander arbeiten, ein Objekt C vorhanden ist, das ein auftreffendes Signal aktiv oder passiv zurücksendet, und der Abstand R_{AB} zwischen dem Sensor A und dem Sensor B, der Abstand R_{AC} zwischen dem Sensor A und dem Objekt C und der Abstand R_{BC} zwischen dem Sensor B und dem Objekt C bekannt ist.

Das Verfahren umfasst folgende Schritte.

In einem ersten Schritt **101** erfolgt ein Aussenden eines Signals $S_{TX_i,C}$ durch den Sender

TX_i mit einer Sendeleistung $P_{TX_i,C}$ zu dem Objekt C und Erfassen des daraufhin vom Objekt C ausgesandten oder reflektieren Signals $S_{RX_i,C}$ durch den Empfänger RX_i mit der Empfangsleistung $P_{RX_i,C}$ für i ϵ {A, B}, zur Ermittlung der Verhältnisse:

$PV_{AC} = \frac{P_{RX_A,C}}{P_{TX_A,C}}$ und $PV_{BC} = \frac{P_{RX_B,C}}{P_{TX_B,C}}$

wobei gilt:

$$PV_{AC} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{AC}}\right)^4 \cdot (G_{RX,A} \cdot G_{TX,A}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right) = 10^{\frac{P_{AC}}{10}}$$

$$PV_{BC} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{BC}}\right)^4 \cdot (G_{RX,B} \cdot G_{TX,B}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right) = 10^{\frac{P_{BC}}{10}}$$

mit:

$(G_{RX,i} \cdot G_{TX,i})$:= zu bestimmender Hardware-Gewinn des Sensors i für i ϵ {A, B},

λ := Wellenlänge,

$\left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right)$:= äquivalenter Gewinn des Objekts C,

σ_C := Radarrückstreuquerschnitt des Objekts C.

In einem zweiten Schritt **102** erfolgt ein Aussenden eines Signals $S_{TX_A,B}$ durch den Sender TX_A mit einer Sendeleistung $P_{TX_A,B}$ zu dem Sensor B, der in dem Transpondermodus mit der Verstärkung $G_{con,B}$ betrieben wird, und ein Erfassen des daraufhin vom Sensor B ausgesandten Signals als $S_{RX_A,B}$ durch den Empfänger RX_A mit der Empfangsleistung $P_{RX_A,B}$ zur Ermittlung des Verhältnisses:

$\frac{P_{RX_A,B}}{P_{TX_A,B}} = PV_{AB}$

wobei gilt:

$$PV_{AB} = \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R_{AB}}\right)^4 \cdot G_{con,B}\right) \cdot (G_{RX,B} \cdot G_{TX,B}) \cdot (G_{RX,A} \cdot G_{TX,A}) = 10^{\frac{P_{AB}}{10}}.$$

In einem dritten Schritt **103** erfolgt ein Ermitteln von Kalbrierfaktoren $F_{cal,i}$ basierend oder

zurückführbar auf folgenden Zusammenhang:

$$\begin{pmatrix} F_{cal,A} \\ F_{cal,B} \\ G_C \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} P_{AB} - C_{AB} \\ P_{AC} - C_{AC} \\ P_{BC} - C_{BC} \end{pmatrix}$$

mit:

$F_{cal,i} = 10 \cdot \log(G_{RX,i} \cdot G_{TX,i} \cdot F_{scale,i})$ für i ∈ {A, B}

$$G_C = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right)$$

$F_{scale,i}$:= Skalierungsfaktor

C_{AB}, C_{AC}, C_{BC} := von λ und den Abständen R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} abhängige Konstanten.

In einem vierten Schritt **104** erfolgt ein Kalibrieren der Sensoren A und B mit den Kalibrierfaktoren $F_{cal,i}$ und des Ziels C über den rückstreuquerschnittsäquivalenten Gewinn G_C.

Obwohl die Erfindung im Detail durch bevorzugte Ausführungsbeispiele näher illustriert und erläutert wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzumfang der Erfindung zu verlassen. Es ist daher klar, dass eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten existierten. Es ist ebenfalls klar, dass beispielhaft genannte Ausführungsformen wirklich nur Beispiele darstellen, die nicht in irgendeiner Weise als Begrenzung etwa des Schutzbereichs, der Anwendungsmöglichkeiten oder der Konfiguration der Erfindung aufzufassen sind. Vielmehr versetzen die vorhergehende Beschreibung und die Figurenbeschreibung den Fachmann in die Lage, die beispielhaften Ausführungsformen konkret umzusetzen, wobei der Fachmann in Kenntnis des offenbarten Erfindungsgedankens vielfältige Änderungen beispielsweise hinsichtlich der Funktion oder der Anordnung einzelner, in einer beispielhaften Ausführungsform genannter Elemente vornehmen kann, ohne den Schutzbereich zu verlassen, der durch die Ansprüche und deren rechtliche Entsprechungen, wie etwa weitergehenden Erläuterungen in der Beschreibung, definiert wird.

Bezugszeichenliste

5	101 – 104	Verfahrensschritte

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung eines Sensorssystems, das zumindest einen Sensor A und einen Sensor B umfasst, wobei
   - der Sensor A einen Sender TX_A zum Aussenden eines Signals S_{TXA} und einen Empfänger RX_A zum Empfangen eines Signals S_{RXA} aufweist, wobei der Empfänger RX_A und der Sender TX_A in einem RADAR-Modus des Sensors A unabhängig voneinander arbeiten,
   - der Sensor B einen Sender TX_B, einen Empfänger RX_B und eine Einheit D aufweist, mit der der Sender TX_B in einem Transpondermodus des Sensors B mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass ein von dem Empfänger RX_B empfangenes Signal S_{RXB} vom Sender TX_B als Signal S_{TXB} wieder ausgesandt wird, wobei eine Verstärkung $G_{con,B}$ zwischen dem empfangenen Signal S_{RXB} und dem wieder ausgesandten Signal S_{TXB} vorgegeben ist, und mit der der Sender TX_B in einem RADAR-Modus des Sensors B nicht mit dem Empfänger RX_B verbunden ist, so dass der Sender TX_B und der Empfänger RX_B unabhängig voneinander arbeiten,
   - ein Objekt C vorhanden ist, das ein auftreffendes Signal aktiv oder passiv zurücksendet, und
   - der Abstand R_{AB} zwischen dem Sensor A und dem Sensor B, der Abstand R_{AC} zwischen dem Sensor A und dem Objekt C und der Abstand R_{BC} zwischen dem Sensor B und dem Objekt C bekannt ist,

   mit folgenden Schritten:

   1.1. Aussenden eines Signals $S_{TX_i,C}$ durch den Sender TX_i mit einer Sendeleistung $P_{TX_i,C}$ zu dem Objekt C und Erfassen des daraufhin vom Objekt C ausgesandten oder reflektieren Signals $S_{RX_i,C}$ durch den Empfänger RX_i mit der Empfangsleistung $P_{RX_i,C}$ für i ϵ {A, B}, zur Ermittlung der Verhältnisse:

   $$PV_{AC} = \frac{P_{RX_A,C}}{P_{TX_A,C}} \text{ und } PV_{BC} = \frac{P_{RX_B,C}}{P_{TX_B,C}}$$

   wobei gilt:

$$PV_{AC} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{AC}}\right)^4 \cdot (G_{RX,A} \cdot G_{TX,A}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right) = 10^{\frac{P_{AC}}{10}}$$

$$PV_{BC} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{BC}}\right)^4 \cdot (G_{RX,B} \cdot G_{TX,B}) \cdot \left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right) = 10^{\frac{P_{BC}}{10}}$$

mit:

$(G_{RX,i} \cdot G_{TX,i})$:= zu bestimmender Hardware-Gewinn des Sensors i für i ϵ {A, B},

λ := Wellenlänge,

$\left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right)$:= äquivalenter Gewinn des Objekts C,

σ_C := Radarrückstreuquerschnitt des Objekts C

1.2. Aussenden eines Signals $S_{TX_A,B}$ durch den Sender TX_A mit einer Sendeleistung $P_{TX_A,B}$ zu dem Sensor B, der in dem Transpondermodus mit der Verstärkung $G_{con,B}$ betrieben wird, und Erfassen des daraufhin vom Sensor B ausgesandten Signals als $S_{RX_A,B}$ durch den Empfänger RX_A mit der Empfangsleistung $P_{RX_A,B}$ zur Ermittlung des Verhältnisses:

$$\frac{P_{RX_A,B}}{P_{TX_A,B}} = PV_{AB}$$

wobei gilt:

$$PV_{AB} = \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi R_{AB}}\right)^4 \cdot G_{con,B}\right) \cdot (G_{RX,B} \cdot G_{TX,B}) \cdot (G_{RX,A} \cdot G_{TX,A}) = 10^{\frac{P_{AB}}{10}}$$

1.3. Ermitteln von Kalbrierfaktoren $F_{cal,i}$ basierend oder zurückführbar auf folgenden Zusammenhang:

$$\begin{pmatrix} F_{cal,A} \\ F_{cal,B} \\ G_C \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} P_{AB} - C_{AB} \\ P_{AC} - C_{AC} \\ P_{BC} - C_{BC} \end{pmatrix}$$

mit:

$F_{cal,i} = 10 \cdot \log(G_{RX,i} \cdot G_{TX,i} \cdot F_{scale,i})$ für i ϵ {A, B}

$$G_C = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi\sigma_C}{\lambda^2}\right)$$

$F_{scale,i}$:= Skalierungsfaktor

C_{AB}, C_{AC}, C_{BC} := von λ und den Abständen R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} abhängige Konstanten, und

1.4. Kalibrieren des Sensors A mit dem Kalibrierfaktor $F_{cal,A}$ und/oder des Sensors B mit dem Kalibrierfaktor $F_{cal,B}$.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
bei dem die Wellenlänge λ jeweils einem Integral über alle Frequenzen eines von dem jeweiligen Sender i, mit i ϵ {A, B}, ausgesandten bandlimitiertem Signal entspricht.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2,
bei dem der Sender TX_B einen Digital-zu-Analog-Konverter und eine Sendeantenne, der Empfänger RX_B einen Analog-zu-Digital-Konverter und eine Empfangsantenne, und die Einheit D eine Einheit zur digitalen Signalverarbeitung ist, die im Transpondermodus den Sender TX_B mit dem Empfänger RX_B zur Datenkommunikation verbindet.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
bei dem der Sensor A und der Sensor B ein RADAR-Sensor oder ein SONAR-Sensor oder ein LIDAR-Sensor sind.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
bei dem die Einheit D im Transpondermodus vom Empfänger RX_B empfangene Signale verstärkt und/oder filtert und/oder zeitverzögert und/oder verformt, bevor diese an den Sender TX_B weitergeleitet werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
bei dem die Abstände R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} folgender Bedingung genügen:

$R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} > (2*D^2)/\lambda$

mit

D: Antennendurchmesser der jeweiligen Sendeantenne

λ: Wellenlänge des Signals S

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
bei dem die Schritte 1.1. bis 1.3. q-fach wiederholt ausgeführt werden mit q = 1, 2, 3, … und der Kalibrierfaktor $F_{cal,A}$ als Mittelwert $<F_{cal,A}>_q$ ermittelt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
bei dem der Sensor A ein satellitengetragenes Radarsystem, der Sensor B ein RADAR-Transponder, und das Objekt C ein Winkelreflektor oder Transponder ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8,
bei dem der Sensor B und/oder Objekt C ein satellitengetragenes Radarsystem ist.

10. System umfassend einen Sensor A, einen Sensor B und ein mit den beiden Sensoren A, B verbundenes Steuer- und Auswertesystem, wobei das Steuer- und Auswertesystem zur Durchführung eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9 eingerichtet und ausgeführt ist.

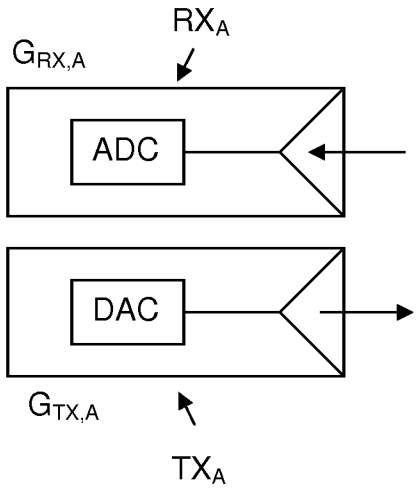


Fig. 1

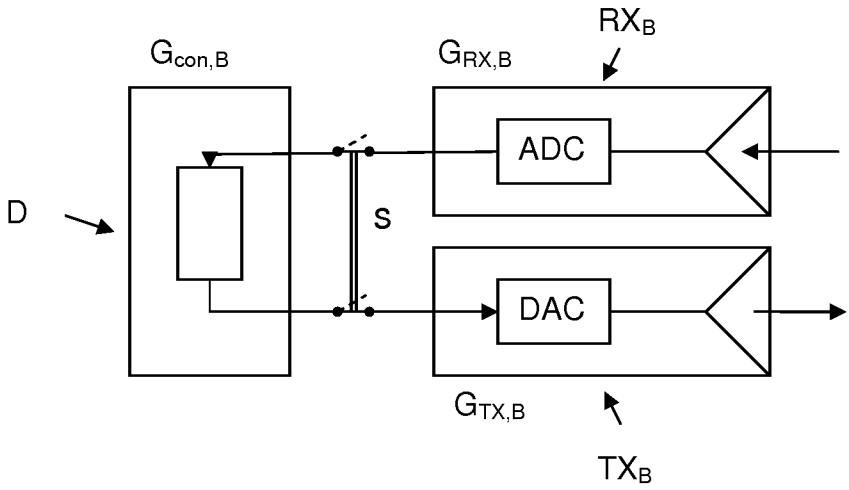


Fig. 2

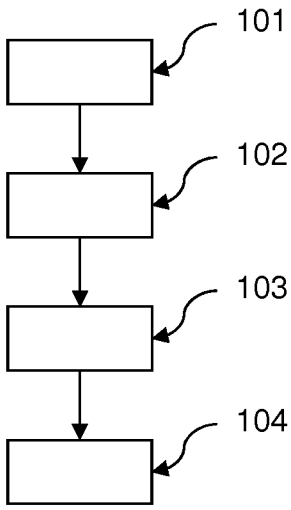


Fig. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/051986

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01S7/40 G01S13/87 G01S13/90
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 10 2014 110079 B3 (DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUMFAHRT E V [DE]) 9 July 2015 (2015-07-09) abstract paragraphs [0017] - [0019], [0021], [0022], [0027], [0032], [0033], [0048], [0067] -----	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
21 March 2017	30/03/2017

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Alberga, Vito

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2017/051986

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102014110079 B3	09-07-2015	CA 2897569 A1	17-01-2016
		CH 709940 A2	29-01-2016
		DE 102014110079 B3	09-07-2015
		GB 2529934 A	09-03-2016

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2017/051986

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01S7/40 G01S13/87 G01S13/90
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01S

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 10 2014 110079 B3 (DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUMFAHRT E V [DE]) 9. Juli 2015 (2015-07-09) Zusammenfassung Absätze [0017] - [0019], [0021], [0022], [0027], [0032], [0033], [0048], [0067] -----	1-10

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
21. März 2017	30/03/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Alberga, Vito

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2017/051986

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102014110079 B3	09-07-2015	CA 2897569 A1	17-01-2016
		CH 709940 A2	29-01-2016
		DE 102014110079 B3	09-07-2015
		GB 2529934 A	09-03-2016