



F1000107767B



SUOMI - FINLAND
(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

(12) PATENTTIJULKAISU
PATENTSKRIFT

(10) FI 107767 B

(45) Patentti myönnetty - Patent beviljats

28.09.2001

(51) Kv.lk.7 - Int.kl.7

H03M 7/00

(21) Patentihakemus - Patentansökning

981168

(22) Hakemispäivä - Ansökningsdag

26.05.1998

(24) Alkuperäivä - Löpdag

26.05.1998

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig

03.02.2000

(73) Haltija - Innehavare

1 •Nokia Mobile Phones Ltd, Keilalahdentie 4, 02150 Espoo, SUOMI - FINLAND, (FI)

(72) Keksijä - Uppfinnare

1 •Hämäläinen, Ari, Linnoituskuja 1 C 19, 01280 Vantaa, SUOMI - FINLAND, (FI)

2 •Henriksson, Jukka, Kurkijoentie 19 C, 02140 Espoo, SUOMI - FINLAND, (FI)

(74) Asiamies - Ombud: Kolster Oy Ab
Iso Roobertinkatu 23, 00120 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning

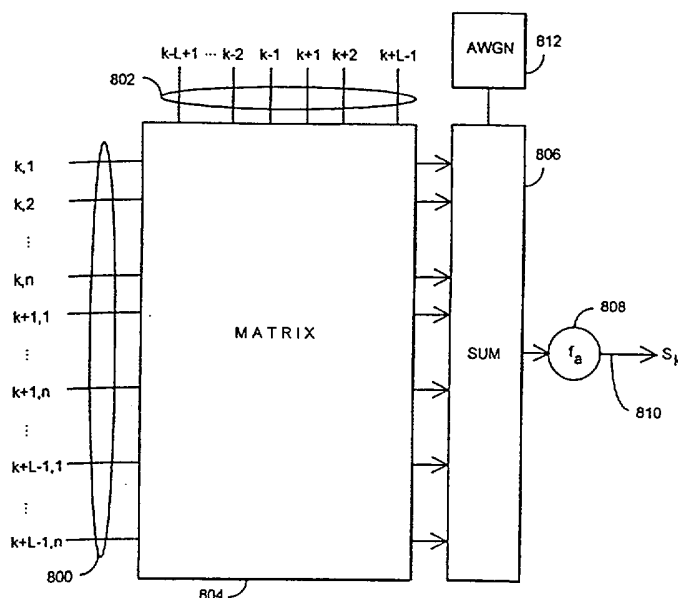
Menetelmä ja järjestely konvoluutiodekoodauksen toteuttamiseksi
Förfarande och arrangemang för att förverkliga konvolutionsdekodning

(56) Viitejulkaisut - Anförda publikationer

JP A 9138787 (G06F 9/44), US A 5293453 (H03M 7/00), US A 5268684 (H03M 7/00), US A 5548684 (G06E 1/00)

(57) Tiivistelmä - Sammandrag

Keksinnön kohteena on menetelmä ja järjestely konvoluutiokoodatun signaalin dekoodaamiseksi, joka signaali käsittää koodisanoja ja joka järjestely käsittää neuroverkon, joka käsittää joukon neuroneita, jotka käsittävät joukon sisäänmenoja ja ulostulon, ja joiden neuronien sisäänmenoihin on kytketty vastaanotetut koodisanat (800), ja joka järjestely käsittää välineet (806) yhdistää osa neuronin sisäänmenoista neuronissa. Konvoluutiokoodauksen tehokkaan dekoodauksen mahdollistamiseksi neuronin sisäänmenoihin on takaisinkytketty osa neuronien ulostulosignaaleista (802) ja että neuroni käsittää välineet (804) kertoa ainakin osa neuronin sisäänmenoista keskenään ennen yhdistelyvälineitä (806) ja että ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaali käsittää estimaatin dekodatusta symbolista.



Uppfinningen avser ett förfarande och ett arrangemang för att förverkliga dekodning av en konvolutionskodad signal, varvid signalen omfattar kodord och arrangemanget omfattar ett neuronnät, vilket omfattar ett antal neuroner, vilka omfattar ett antal ingångar och en utgång, varvid till neuronernas ingångar har kopplats de mottagna kodorden (800), varvid arrangemanget omfattar don (806) för sammankoppling av en del av neuronens ingångar i neuronen. För att möjliggöra en effektiv dekodning av konvolutionskodningen har till en del av neuronens ingångar återkopplats en del av neuronnätets neuroners utgångssignaler (802), varvid neuronen omfattar don (804) för multiplisering av åtminstone en del av neuronens ingångar sinsemellan före donen för sammankoppling (806) och en på förhand bestämd neurons utgångssignal omfattar ett estimat av en dekodad symbol.

Menetelmä ja järjestely konvoluutidekoodauksen toteuttamiseksi

Keksinnön ala

Keksinnön kohteena on menetelmä ja järjestely lähettimessä konvoluutikoodatun signaalin dekoodaamiseksi vastaanottimessa takaisinkytketyn neuroverkon avulla.

Keksinnön tausta

Tietoliikenneyhteyksissä signaalien välittämiseen käytetty siirtotie aiheuttaa tunnetusti häiriötä tietoliikenteelle. Tätä tapahtuu riippumatta siirtotien fyysisestä muodosta, olipa siirtotie esimerkiksi radioyhteys, valokuitu tai kuparikaapeli.

Siirtotien aiheuttamien häiriöiden vaikutusten pienentämiseksi digitaalinen signaali koodataan, jotta siirtoyhteys saataisiin luotettavammaksi. Tällöin häiriöiden aiheuttamat virheet siirrettävässä signaalissa pystytään havaitsemaan ja käytettävästä koodausmenetelmästä riippuen myös korjaamaan ilman uudelleenlähetyksiä. Perinteisiä digitaalisessa tietoliikenteessä käytettyjä -koodausmenetelmiä ovat esimerkiksi lohkokoodaus ja konvoluutikoodaus. Lohkokoodauksessa koodattavat bitit ryhmitellään lohkoihin, joiden perään lisätään pariteettibittejä, joiden avulla edeltävän lohkon bittien oikeellisuus voidaan tarkistaa.

Tyypillinen solukkoradiosovellutuksissa käytetty koodausmenetelmä on konvoluutikoodaus, joka sopii hyvin häipyvään kanavaan. Konvoluutikoodauksessa pariteettibitit ovat databittien joukossa siten, että koodaus on jatkuvaa. Databittejä ei ole ryhmitelty lohkoihin, eivätkä pariteettibitit liity välittömästi edeltäviin databitteihin, vaan ne on jaettu tietyn pituisen bittijoukon alueelle, jota bittimäärää kutsutaan konvoluutikoodin koodaussyvyudeksi.

Konvoluutikoodaus voidaan saada aikaan siirtorekisterin avulla. Tätä havainnollistetaan kuviossa 1. Yleisesti esitettynä, siirtorekisteri koostuu k -bittisistä asteista 100 - 104, joiden lukumäärä on L ja lineaarisista funktiogeneraattoreista 106 - 112, joiden lukumäärä on n . Tässä oletetaan että koodattava data on binääristä. Data 114 siirretään siirtorekisteriin 116 k -bittiä kerrallaan. Ulostulossa 118 on jokaista k -bittistä sisäänmenosekvenssiä kohden n bittiä. Tätä suhdetta $R_c = k/n$ sanotaan koodaussuhteeksi. Parametriä L sanotaan konvoluutikoodin koodaussyvyudeksi.

Konvoluutiokoodauksen tehokkuus riippuu käytetystä koodaussuhteesta ja koodaussyvyydestä. Suuri koodaussyvyys mahdollistaa suuren virheiden korjauskyvyn, mutta toisaalta tällöin dekodaus on tunnetuilla menetelmillä erittäin mutkikasta.

5 Konvoluutiokoodaus puretaan eli dekodataan yleensä käyttäen Viterbi algoritmia, jonka suorituskyky on lähes optimaalinen. Viterbin haittana on kuitenkin se, että sen kompleksisuus kasvaa eksponentiaalisesti koodaussyvyyden kasvaessa. Tämä on rajoittanut käytettävissä olevia koodaussyvyyksiä.

10 Toinen tunnettu dekodausmenetelmä on sekventiaalinen dekodaus, jota on selostettu tarkemmin julkaisussa J. G. Proakis, Digital Communications, 3rd edition, sivut 500-503. Tämän algoritmin haittana on mm. se, että dekodausviive ei pysy vakiona vaan vaihtelee.

Eräs toinen tunnettu dekodausmenetelmä on ns. stack algoritmi, 15 jota on selostettu tarkemmin edellä mainitussa julkaisussa J. G. Proakis, Digital Communications, 3rd edition, sivut 503-506. Tämän algoritmin suorituskyky ei ole Viterbi algoritmin veroinen.

Julkaisussa US5548684 on esitetty menetelmä, jossa sovelletaan neuroverkkoja konvoluutiokoodin dekodauksessa. Julkaisun mukaisessa me- 20 netelmässä neuroverkon avulla toteutetaan Viterbi algoritmi. Ratkaisun suorituskyky ei kuitenkaan ole riittävä käytännön sovelluksiin.

Viterbi algoritmi on suorituskyvyltään paras tunnettu menetelmä konvoluutiokoodauksen dekodaukselle, mutta sen käytännön toteutus koo- 25 daussyvyyden kasvaessa on osoittautunut erittäin hankalaksi. Monimutkaisen Viterbi algoritmin hankala piiritekninen toteutus on rajoittanut käytettävissä olevia koodaussyvyyksiä.

Keksinnön lyhyt selostus

Keksinnön tavoitteena on siten toteuttaa menetelmä ja menetelmän toteuttava järjestely siten, että yllä mainitut ongelmat saadaan ratkaistua. Tä- 30 mä saavutetaan keksinnön mukaisella menetelmällä konvoluutiokoodatun signaalin dekodaukselle, joka signaali käsittää koodisanoja ja jossa menetelmässä dekodaus suoritetaan keinotekoisien neuroverkon avulla, joka neuroverkko käsittää joukon neuroneita, jotka käsittävät joukon sisäänmenoja ja ulostulon, ja että neuronin sisäänmenoihin ohjataan vastaanotettu koodisana- 35 joukko siirtorekisterin avulla, ja jossa neuronissa yhdistetään osa neuronin sisäänmenoista.

Keksinnön mukaiselle menetelmälle on tunnusomaista, että takaisinkytketään kunkin neuronin sisäänmenoihin osa neuroverkon neuronien ulostulosignaaleista ja että ainakin osa neuronin sisäänmenoista kerrotaan keskenään ennen yhdistelemistä ja että asetetaan neuroneihin alkuarvot ja annetaan verkon asettua tasapainotilaan, ohjataan dekodatun symbolin estimaatti ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaalista verkon ulostuloon verkon saavutettua tasapainotilan, päivitetään siirtorekisterissä olevaa koodisanajoukkoa, ja toistetaan yllä kuvattua neljää askelta kunnes haluttu määrä koodisanoja on dekodattu.

10 Keksinnön kohteena on myös järjestely konvoluutiokoodatun signaalin dekodaaamiseksi, joka signaali käsittää koodisanoja ja joka järjestely käsittää neuroverkon, joka käsittää joukon neuroneita, jotka käsittävät joukon sisäänmenoja ja ulostulon, ja joiden neuronien sisäänmenoihin on kytketty vastaanotetut koodis sanat, ja joka järjestely käsittää välineet yhdistää osa neuronin sisäänmenoista neuronissa.

15 Keksinnön mukaiselle järjestelylle on tunnusomaista, että neuronin sisäänmenoihin on takaisinkytketty osa neuroverkon neuronien ulostulosignaaleista ja että neuroni käsittää välineet kertoa ainakin osa neuronin sisäänmenoista keskenään ennen yhdistelyvälineitä ja että ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaali käsittää estimaatin dekodatusta symbolista.

20 Keksinnön edulliset suoritusmuodot ovat epäitsenäisten patenttivaatimusten kohteena.

Keksinnön mukaisessa ratkaisussa konvoluutiokoodi dekodataan takaisinkytketyn neuroverkon avulla. Keksinnön mukaisella ratkaisulla saavutetaan useita etuja. Keksinnön mukaisella ratkaisulla saavutetaan lähes Viterbi algoritmin mukainen suorituskyky huomattavasti yksinkertaisemmalla piiritoteutuksella. Samalla piiritoteutuksen mutkikkuudella voidaan keksinnön mukaisessa ratkaisussa käyttää suurempaa koodaussyvyyttä ja täten parempaa virheenkorjausta kuin Viterbi algoritmin yhteydessä.

30 Keksinnön mukainen neuroverkko on mahdollista rakentaa helposti puolijohdetekniikalla, sillä neuroverkon neuronit ovat rakenteeltaan hyvin samankaltaisia keskenään, ainoastaan sisäänmenojen kytkennät vaihtelevat. Täten suurenkin verkon suunnittelu ja toteutus vaatii melko vähäisen työmäärän. Ratkaisu voidaan myös toteuttaa edullisesti VLSI-piirinä ja siten se on nopea.

Kuvioiden lyhyt selostus

Keksintöä selostetaan nyt lähemmin edullisten suoritusmuotojen yhteydessä, viitaten oheisiin piirroksiin, joissa

5 kuvio 1 esittää jo selostettua esimerkkiä konvoluutiokooderista,
kuvio 2 havainnollistaa esimerkkiä tietoliikennejärjestelmästä, jossa keksinnön mukaista ratkaisua voidaan soveltaa,

kuvio 3 esittää esimerkkiä keksinnön mukaisen menetelmän avulla suunnitellusta neuronista,

10 kuvio 4 esittää esimerkkiä keksinnön mukaisen menetelmän avulla suunnitellun neuroverkon neuronin kytkennöistä,

kuvio 5 esittää toista esimerkkiä keksinnön mukaisen menetelmän avulla suunnitellusta neuronista,

kuviot 6a ja 6b esittävät toista esimerkkiä keksinnön mukaisen menetelmän avulla suunnitellun neuroverkon neuronin kytkennöistä,

15 kuviot 7a ja 7b havainnollistavat esimerkkiä keksinnön mukaisen neuroverkon toteutuksesta ja

kuvio 8 havainnollistaa esimerkkiä keksinnön mukaisen neuroverkon neuronin toteutuksesta.

Keksinnön yksityiskohtainen selostus

20 Keksinnön mukaista ratkaisua voidaan soveltaa missä tahansa digitaalises-
sa tiedonsiirtojärjestelmässä, jossa siirrettävä signaali on koodattu kon-
voluutiokoodauksella. Eräitä esimerkkejä mahdollisista järjestelmistä ovat so-
lukkoradiojärjestelmät, radiolinkit, kiinteät verkot tai optiset verkot.

25 Kuviossa 2 havainnollistetaan esimerkkiä eräästä keksinnön mukai-
sesta tietoliikennejärjestelmästä. Kuviossa on esitetty lähetin 200, signaalin
siirtotie 202 sekä vastaanotin 204. Keksinnön mukaiset toiminnot on toteutettu
vastaanottimessa. Signaalin siirtotie voi olla esimerkiksi radiotie, kuparikaapeli
tai optinen kuitu.

30 Lähettimessä datalähde 206 tuottaa signaalin 208, joka koostuu bi-
teistä. Datalähteen signaaliin 208 voidaan tarvittaessa lisätä virheenkorjaava
koodi jollain tunnetulla FEC (Forward Error Correcting) menetelmällä. Tätä ei
ole kuviossa näytetty. Signaali 208 viedään kooderille 210, jossa suoritetaan
konvoluutiokoodaus halutuilla parametreilla (koodaussyvyys ja koodaussuh-
de). Kooderin rakenne voi olla esimerkiksi kuviossa 1 kuvatun kaltainen. Koo-
35 dattu signaali voidaan käsittää koodisanoina, joiden pituus riippuu käytetystä

koodista. Koodattu signaali viedään modulaattorille 212, jossa suoritetaan ha-
luttu modulointi. Moduloitu signaali viedään edelleen lähettimen pääteasteisiin
214 ja kanavasovittimelle 216, jotka ovat järjestelmästä riippuvia komponentte-
ja. Pääteaste 214 voi olla esimerkiksi radiotaajuusvahvistin ja suodatin. Kana-
vasovitin 216 voi olla esimerkiksi antenni tai sähkö/optomuunnin.

Lähettimen ulostulosignaali 218 kulkee siirtotien 202 eli kanavan lä-
pi vastaanottimelle 204. Vastaanotin käsittää kanavasovittimen 220 sekä vas-
taanottimen esiasteen 222, jotka ovat järjestelmästä riippuvia komponentteja.
Pääteaste 222 voi käsittää esimerkiksi radiotaajuusvahvistimen ja suodatti-
men. Kanavasovitin 220 voi käsittää esimerkiksi antennin tai opto/sähkömuun-
timen. Signaali viedään esiasteelta 222 edelleen demodulaattoriin 224, josta
tyypillisesti saadaan kantataajuinen bittivirta 226, joka voi olla kompleksinen
käsittäen erilliset I- ja Q-haarojen bitit. Vastaanotetusta signaalista johdetaan
ajastusinformaatio regeneraattorissa 228 jollain tunnetulla menetelmällä. Tätä
ajastusinformaatiota käytetään demoduloinnissa. Vastaanotin käsittää edel-
leen ohjausyksikön 230, joka edullisesti voidaan toteuttaa prosessorin avulla.
Ohjausyksikkö 230 kontrolloi vastaanottimen toimintaa. Informaatio ajastuk-
sesta viedään myös ohjausyksikölle.

Demodulaattorilta 224 tuleva signaali 226 käsittää siis demoduloidut
bitit, jotka voidaan kuvata koodisanoina. Koodisanat viedään dekooderille 232,
joka keksinnön mukaisessa vastaanottimessa on toteutettu neuroverkon avul-
la. Dekooderissa puretaan konvoluutiokoodaus ja dekooderin ulostulosignaali
324 vastaa alkuperäistä signaalia 208. Mikäli lähettimessä oli käytetty virheen-
korjaavaa koodia, se puretaan tässä vaiheessa. Tätä ei ole kuviossa näytetty.

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin keksinnön mukaista menetel-
mää konvoluutiokoodin dekoodaamiseksi. Yleisesti, dekoodauksen tehtävänä
on löytää bittisekvenssi B , joka minimoi funktion

$$\min_B \sum_{s=0}^T \|r(t+sdt) - \gamma(B(t+sdt))\|^2 =: \min_B f(B) \quad (1)$$

missä $r(t+sdt)$ on vastaanotettu koodisana ajan hetkellä $t+sdt$, dt on näytteen-
ottoväli, on γ kooderifunktio ja $B(t+sdt)$ on vektori, jonka komponentit ovat de-
koodatut bitit.

Selkeyden takia jatkossa käytetään merkintöjä $r(s) = r(t+sdt)$ ja $B(s)$
 $= B(t+sdt)$. Edelleen bittiarvojen 0 ja 1 asemasta käytetään arvoja -1 ja 1. Yh-
tälössä (1)

$$B(s) = [b(s-L+1), \dots, b(s)], \quad b \in \{-1, 1\},$$

$b(-L+1), \dots, b(0)$ ovat kiinteitä, L on koodaussyvyys ja T on dekodausviive. Kooderifunktio γ vastaa konvoluutiokooderin generaattorimatriisia G . Siirtotiellä signaaliin tulee häiriötä, kuten kohinaa. Merkitään ajan hetkellä s vastaanotet-
5 tuu kohinaista koodisanaa $r(s)$. Oletetaan, että kohina on valkoista Gaussin kohinaa.

Tarkastellaan tässä keksinnön mukaisen neuroverkon muodostamista esimerkin avulla, jossa käytetään konvoluutiokoodia, jonka koodaussuhde on $\frac{1}{2}$ ja koodaussyvyys $L = 3$. Generaattorimatriisi G tällaiselle koodille on

$$10 \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Kooderi koodaussuhteen $\frac{1}{2}$ konvoluutiokoodille koodaussyvyydellä L voidaan kirjoittaa funktiona

$$\gamma(B(s)) = [\gamma_1(B(s)), \gamma_2(B(s))],$$

missä

$$15 \quad \gamma_j(B(s)) = \prod_{i=1}^L b(s+1-i)^{g_{ji}} (-1)^{g_{ji}},$$

ja g_{ji} ovat matriisin G elementit. Nyt, kun tässä esimerkissä $L = 3$, kooderi on siis muotoa

$$\gamma(B(s)) = [-b(s) b(s-2), b(s)b(s-1)b(s-2)]$$

ja vastaanotettu kohinainen koodisana on $r(s) = [r_1(s) r_2(s)]$.

20 Kun otetaan yhtälöstä (1) osittaisderivaatta $b(k)$:n suhteen, saadaan

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(B)}{\partial b(k)} &= r_1(k)b(k-2) - r_2(k)b(k-1)b(k-2) \\ &\quad - r_2(k+1)b(k+1)b(k-1) + r_1(k+2)b(k+2) \\ &\quad - r_2(k+2)b(k+1)b(k+2) + 5b(k). \end{aligned} \quad (2)$$

Käytettäessä gradienttimenetelmää, $b(k)$:ta päivitetään seuraavasti:

$$b(k) = b(k) - \alpha \frac{\partial f(B)}{\partial b(k)}. \quad (3)$$

Edelleen, asettamalla $\alpha = 1/5$ ja olettaen, että $b(k)$ saa arvoja -1 tai 1 , kaikille arvoille $k = 0, \dots, T$ pätee yhtäsuuruus

$$\begin{aligned} b(k) &= \text{sign}(-r_1(k)b(k-2) + r_2(k)b(k-1)b(k-2) \\ &\quad + r_2(k+1)b(k+1)b(k-1) - r_1(k+2)b(k+2) \\ &\quad + r_2(k+2)b(k+1)b(k+2)). \end{aligned} \quad (4)$$

Tästä saadaan seuraava päivityssääntö: valitaan yksi k kerrallaan ja päivitetään vastaavaa bittiä käyttäen kaavaa (4) ja toistetaan tätä kunnes biteissä ei tapahdu muutoksia, eli verkko on stabiloitunut. Tässä on huomattava, että jos

$k = T-1$, tai $k = T$, niin asetetaan $b(T+1) = 0$ ja $b(T+2) = 0$. Todellisessa toteutuksessa voidaan haluttaessa toimintaa rinnakkaistaa siten, että kaikkia neurooneita k päivitetään yhtäaikaan.

Kaavan (4) mukainen iteraatio voidaan esittää keinotekoisena neuroverkon neuronina. Asettamalla $S_k = b(k)$, missä S_k on k :nnen neuronin tila ja $I_l = r(l)$, missä $I_l = [I_{l,1}, I_{l,2}]$ ovat neuronille tulevat ulkoiset syötteet, voidaan k :nnen neuronin tila esittää seuraavasti:

$$S_k = f_a(-I_{k,1}S_{k-2} + I_{k,2}S_{k-1}S_{k-2} + I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+2,1}S_{k+2} + I_{k+2,2}S_{k+1}S_{k+2}), \quad (5)$$

missä f_a on aktivaatiofunktio, tyypillisesti sigmoidifunktio tai kova rajoitin. Kaavassa (4) on käytetty signumfunktioita $f_a(x) = \text{sign}(x)$.

Kaavan (5) mukaista neuronია havainnollistetaan kuviossa 3. Neuronin ulostulossa on neuronin tila S_k . Neuroniin tulee sisäänmenona 300 dekodattavat koodisanat, jotka tässä esimerkissä koostuvat kahdesta bitistä. Koska käytetyn koodin koodisuhde oli $\frac{1}{2}$, niin koodattaessa kutakin yhtä koodattavaa bittiä kohti tuli kaksi bittiä. Vastaavasti dekodauksessa kahta koodisanan bittiä vastaa yksi dekodattu bitti. Kaavan (5) mukaisesti neuroniin tulevat sisäänmenona bitit $I_{k,1}$, $I_{k,2}$, $I_{k+1,2}$ ja $I_{k+2,2}$. Edelleen neuroniin tulee sisäänmenona 302 takaisinkytkettyjä muiden neuroverkon neuroneiden ulostuloja, eli S_{k-2} , S_{k-1} , S_{k+1} ja S_{k+2} . Kunkin neuronin ulostulossa on siis yksi dekodattu bitti. Neuroniin tulee siis sisäänmenona yhtälön 5 mukaisesti dekodattavan koodisanan molemmat bitit $I_{k,1}$, $I_{k,2}$, ja seuraavien koodisanojen toiset bitit $I_{k+1,2}$ ja $I_{k+2,2}$ sekä kahden edeltävän ja kahden seuraavan neuronin ulostuloarvot.

Keksinnön edullisessa toteutusmuodossa neuronissa ei ole takaisinkytkentää omaan itseensä, eli neuroniin ei tule sisäänmenona arvoa S_k . Yllä esitettyssä kaavan (5) johdossa tämän takaisinkytkennän puuttumisen saa aikaan kerroin α , jonka arvolla $1/5$ kaavasta (2) poistuu termi $5b(k)$. Neuronin sisäänmenot kerrotaan kaavan (5) mukaisesti keskenään. Tätä havainnollistaa viivojen leikkauskohdissa olevat pallot. Valkeat pallot 304 - 314 merkitsevät sisäänmenojen kerrontaa ja mustat pallot 316 - 318 merkitsevät sisäänmenojen kerrontaa ja tulon etumerkin vaihtoa. Kerrotut signaalit summataan 320 ja vietään aktivaatiofunktiolle 322, jonka ulostulo S_k 324 on neuronin ulostuloarvo.

Aktivaatiofunktiona voidaan siis käyttää joko kovan tai pehmeän päätöksen tuottavaa funktiota. Mikäli tulos on kova päätös, niin neuronin ulostulot voivat saada arvoja -1 tai 1 . Mikäli tulos on pehmeä päätös, niin neuronin ulostulo voi olla liukuluku. Vastaavasti mikäli demodulaattori 224 tuottaa peh-

meitä bittipäätöksiä, niin neuronin sisäänmenossa 300 on liukulukuja, ja mikäli demodulaattori tuottaa kovia bittipäätöksiä, niin neuronin sisäänmenossa 300 on bittejä. Jos molemmissa neuronin sisäänmenoista on bittejä, niin sisäänmenojen välinen kerronta voidaan toteuttaa yksinkertaisesti digitaalitekniikan keinoin.

Koska johdettu neuroverkko on ns. optimoiva neuroverkko, se voi juuttua paikalliseen minimiin. Tämän välttämiseksi keksinnön eräässä edullisessa toteutusmuodossa neuroneissa sisääntulevaan signaaliin lisätään kohinaa, jonka varianssi pienenee stabiloitumisvaiheen aikana. Tällöin kaava (5) on muotoa

$$S_k = f_a(-I_{k,1}S_{k-2} + I_{k,2}S_{k-1}S_{k-2} + I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+2,1}S_{k+2} + I_{k+2,2}S_{k+1}S_{k+2} + \text{AWGN}). \quad (6)$$

Yleisesti jokaiselle vastaanotetulle koodisanalle suoritetaan seuraavat vaiheet dekodauksessa:

1. Asetetaan S_{-1} ja S_{-2} aikaisempien päätösten mukaisiksi. Asetetaan vastaanotetut koodisanat $r(t), \dots, r(t+Tdf)$ sisäänmenoihin I_0, \dots, I_T .
 2. Alustetaan $S(i)$, $i = 0, \dots, T$.
 3. Jokaiselle $k = 0, \dots, T$ päivitetään neuronin k yhtälön (6) mukaisesti.
 4. Pienennetään lisätyn kohinan varianssia. Jos tarvittava määrä iteraatiokierroksia on tehty, lopetetaan, muutoin mennään askeleeseen 3.
- Tämän jälkeen dekodattava bitti on neuronin 0 ulostulossa.

Kuviossa 4 havainnollistetaan koodaussuhteen $\frac{1}{2}$ ja koodaussyvyyden 3 dekodaukseen suunnitellun neuroverkon yksittäiseen neuronin k liittyviä kytkentöjä. Yksittäiseen neuronin tulee sisäänmenona demoduloidut koodisanat 300 ja ulostulot neuroneista 400, 402, 406 ja 408. Neuronin ulostulo on aktivaatiofunktion 410 arvo, joka arvo on dekodattu symboli. Neuroverkko alustetaan siten, että neuronien -2 ja -1 tiloiksi tulee aiemmin tehdyt bittipäätökset. Neuronien $0, \dots, T$ tiloiksi asetetaan satunnaisesti +1 tai -1. Tämän jälkeen verkon annetaan stabiloitua. Dekoodattu bitti on neuronin 404 eli neuronin 0 ulostulo tai, jos dekodataan useampi bitti kerrallaan, niin neuroneiden $0, \dots, N$ ulostulot.

Verkon stabiloitumisaika voidaan määrittää joko siten, että annetaan iteraatioiden jatkua kunnes ulostulossa oleva bitti ei vaihtelee, tai suorittamalla etukäteen määrätty määrä iteraatiokierroksia.

Konvoluutiokoodille, jonka koodaussuhde on $\frac{1}{2}$ ja koodaussyvyys $L = 9$, voidaan johtaa yllä kuvatun kaltaisesti seuraava kaava, jonka avulla neuroverkko ja neuronit voidaan muodostaa:

$$\begin{aligned}
S_k = f_a &(-I_{k,1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-5}S_{k-6}S_{k-7}S_{k-8} \\
&- I_{k,2}S_{k-1}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-7}S_{k-8} + I_{k,3}S_{k-1}S_{k-2}S_{k-5}S_{k-8} \\
&- I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-6}S_{k-7} + I_{k+1,3}S_{k+1}S_{k-1}S_{k-4}S_{k-7} \\
&+ I_{k+2,1}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-5}S_{k-6} + I_{k+2,3}S_{k+2}S_{k+1}S_{k-3}S_{k-6} \\
&+ I_{k+3,1}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-5} - I_{k+3,2}S_{k+3}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-4}S_{k-5} \\
&- I_{k+4,2}S_{k+4}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-3}S_{k-4} + I_{k+5,1}S_{k+5}S_{k+3}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-2}S_{k-3} \\
&+ I_{k+5,3}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+3}S_{k-3} + I_{k+6,1}S_{k+6}S_{k+4}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-1}S_{k-2} \\
&+ I_{k+7,1}S_{k+7}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+7,2}S_{k+7}S_{k+6}S_{k+4}S_{k+3}S_{k-1} \\
&+ I_{k+8,1}S_{k+8}S_{k+6}S_{k+5}S_{k+3}S_{k+2}S_{k+1} - I_{k+8,2}S_{k+8}S_{k+7}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+1} \\
&+ I_{k+8,3}S_{k+8}S_{k+7}S_{k+6}S_{k+3} + \text{AWGN}.
\end{aligned} \tag{7}$$

5 Yllä kuvatun kaavan mukaisen neuronin rakennetta havainnollistetaan kuviossa 5. Neuronin sisäänmenoissa 500 on vastaanotetut koodisanat ja sisäänmenoissa 502 on takaisinkytkennät neuroverkon muista neuroneista. Sisäänmenojen kertomiset ja etumerkkien vaihdot tapahtuvat kaavan (7) mukaisesti ja summauksessa 504 lisätään kohinaa, jonka varianssi pienenee stabi-
10 loitumisen aikana. Vastaavan neuroverkon yksittäisen neuronin k kytkentöjä havainnollistetaan kuvioissa 6a ja 6b, jossa kukin neuronin 600 - 632 on kuviossa 5 esitetyn kaltainen.

Paikalliseen minimiin juuttumista voidaan kohinan lisäyksen ohella tai sijasta käyttää myös muita menetelmiä. Suoritettavien iteraatiokierrosten lu-
15 kumäärää voidaan kasvattaa. Toinen vaihtoehto on käyttää useita rinnakkaisia neuroverkkoja. Kun jokainen neuroverkko on stabiloitunut, voidaan verkkojen ulostuloista valita paras bittipäätös. Valinta voidaan suorittaa esimerkiksi enemmistö päätöksellä, jossa valitaan se bittipäätös, joka esiintyy useimmiten rinnakkaisten neuroverkkojen ulostulossa. Voidaan myös suorittaa dekodaus-
20 tuloksen uudelleenkoodaus, ja verrata saatua tulosta vastaanotettuun koodisanaan, eli valita ratkaisu, joka minimoi funktion

$$\frac{1}{T_b} \sum_{s=0}^{T_b} \|r(s) - r_{re}(s)\|^2. \tag{8}$$

Dekoodausta voidaan myös nopeuttaa siten, että neuroverkosta otetaan ulos useampia bittipäätöksiä vierekkäisistä neuroneista samanaikai-
25 sesti, eli neuroneista S_0, \dots, S_N . Dekoodattaessa seuraavia bittejä, neuroneiden S_{-L+1}, \dots, S_{-1} tilat täytyy alustaa edellä saaduiksi arvoiksi.

Keksinnön mukaista dekodausmenetelmää voidaan myös soveltaa silloin, kun purettava koodi on punkturoitu koodi.

Tarkastellaan seuraavaksi keksinnön mukaisen ratkaisun kompleksisuutta lähinnä toteutuksen kannalta. Kun koodaussyvyys L kasvaa tarvitaan
 5 enemmän neuroneita neuroverkossa ja stabiloitumisaika kasvaa, josta seuraa kertolaskujen määrän kasvu. On tunnettua, että Viterbi dekooderin kompleksisuus kasvaa eksponentiaalisesti koodaussyvyyden L kanssa. Keksinnön mukaisen neuroverkon avulla toteutetun dekooderin kompleksisuus kasvaa kuitenkin paljon hitaammin. Kun koodaussyvyys on L , niin kukin neuroverkon
 10 neuroni on kytketty $L-1$:een edelliseen ja $L-1$:een seuraavaan neuroniiin ja L :ään sisäänmenoon. Jos oletetaan, että dekodausviive on $5L$, kuten yleensä on laita, niin dekooderissa tarvitaan $5L$ neuronaa ja täten yhteyksien lukumäärä on

$$(2(L-1) + Ln)(5L) = 10L^2 + 5nL^2 - 10L,$$

15 missä n on generaattoreiden lukumäärä. Edellä olevissa esimerkeissä $n = 2$. Yhdessä neuronissa suoritettavien kertolaskujen lukumäärä riippuu käytetystä koodigeneraattorista, mutta on $\leq O(nL^2)$. Täten yhden iteraatiokierroksen aikana, jolloin kutakin neuronaa päivitetään kerran, suoritettavien kertolaskujen määrä on $5LnL^2 = O(nL^3)$. Tämä osoittaa, kuinka kompleksisuus keksinnön
 20 mukaisessa ratkaisussa kasvaa huomattavasti hitaammin kuin Viterbi algoritmin yhteydessä L :n kasvaessa.

Tarkastellaan seuraavaksi keksinnön mukaisen dekooderin rakennetta toteutuksen kannalta. Keksinnön mukaisen neuroverkon rakennetta havainnollistetaan kuviossa 7a. Neuroverkko käsittää joukon neuroneita 700 -
 25 710, joiden toteutusta tarkastellaan tuonnempana. Neuroverkkoon tuodaan sisäänmenona koodisanat 712, jotka viedään siirtorekisteriin 714. Siirtorekisterissä on talletettuna viimeiset $T + L$ koodisanaa, jossa T on dekodausviive. Aina kun koodisana on saatu dekodattua, poistetaan dekodattu koodisana rekisteristä, siirretään rekisterissä olevia koodisanoja yksi eteenpäin ja otetaan
 30 uusi koodisana rekisterin viimeiseen muistipaikkaan 716. Siirtorekisteri on toiminnallisesti kytketty neuroverkon neuroneiden 700 - 710 sisäänmenoihin. Neuroverkko käsittää edelleen puskurimuistin (720), jonka sisäänmenona on neuroneiden 700 - 710 ulostulot ja jonka puskurimuistin ulostulo on toiminnallisesti kytketty neuroverkon neuroneiden sisäänmenoihin 718. Neuroneiden lu-
 35 kumäärä riippuu dekodattavan konvoluutiokoodin ominaisuuksista.

Neuroverkon neuroneiden ulostulot on siis toiminnallisesti kytketty puskurimuistiin 720, josta ulostulot on takaisinkytketty 722 neuroneiden sisäänmenoihin 718. Neuroneiden sisäänmenossa on kytkentävälineet 718, joiden avulla kuhunkin neuroniin viedään vain tarpeelliset koodisanat ja takaisinkytkennät dekoodattavan konvoluutiokoodin perusteella johdetun kaavan (kuten kaavat (6) ja (7) yllä) mukaisesti. Kytkentävälineet 718 voidaan toteuttaa kytkentämatriisin tai porttilogiikan avulla. Kulloinkin dekoodattava bitti saadaan aktivaatiofunktion laskevan laskentavälineen 724 ulostulosta. Laskentaväline 724 voidaan toteuttaa porttilogiikan tai prosessorin avulla.

10 Neuroverkkodekooderi käsittää ohjausyksikön 726, jolle tulee sisäänmenona kellosignaali 728 vastaanottimen ajastusinformaation regeneraattorilta, kuten on kuvion 2 yhteydessä selostettu. Ohjausyksikkö huolehtii dekooderin ajastuksesta, verkon stabiloitumisajan valvonnasta ja ohjaa dekoodauksen toimintaa.

15 Kuviossa 7b havainnollistetaan toista edullista toteutusvaihtoehtoa, jossa neuroverkosta otetaan ulos useampia bittipäätöksiä vierekkäisistä neuroneista samanaikaisesti, eli neuroneista $k \dots k+n$. Tällöin myös aina kun koodisanat on saatu dekoodattua, poistetaan n dekoodattua koodisanaa rekisteristä, siirretään siirtorekisterissä 714 olevia koodisanoja vastaava määrä n eteenpäin ja otetaan n uutta koodisanaa rekisteriin.

20 Kuviossa 8 havainnollistetaan keksinnön mukaisen neuroverkon neuronin rakennetta. Neuronin ulostulossa on neuronin tila S_k . Neuroniin tulee sisäänmenona 800 dekoodattavat koodisanat, jotka käsittävät bittejä. Kunkin koodisanan bittien lukumäärä riippuu käytetyn koodin koodisuhteesta. Edelleen neuroniiin tulee sisäänmenona 802 takaisinkytkettyjä muiden neuroverkon neuroneiden ulostuloja. Keksinnön edullisessa toteutusmuodossa neuronissa ei ole takaisinkytkentää omaan itseensä, eli neuroniin ei tule sisäänmenona arvoa S_k , mutta tarvittaessa takaisinkytkentä omaan itseensä on myös mahdollinen.

30 Neuronin sisäänmenot kerrotaan keskenään matriisissa 804. Matriisin kytkennät määrää käytetty konvoluutiokoodi, ja kytkentää vastaava kaava voidaan johtaa kuten yllä olevissa esimerkeissä on havainnollistettu. Sisäänmenot voidaan kertoa joko etumerkin vaihdoin kanssa tai ilman etumerkin vaihtoa. Kerrotut signaalit viedään summaimelle 806, jossa ne summataan ja
35 josta summasignaali viedään edelleen laskentavälineelle 808, joka laskee akti-

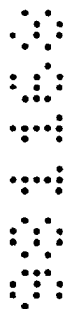
vaatiofunktion ja jonka ulostulo S_k 810 on neuronin ulostuloarvo. Laskentaväline 724 voidaan toteuttaa porttilogiikan tai prosessorin avulla.

Aktivaatiofunktiona voidaan siis käyttää joko kovan tai pehmeän päätöksen tuottavaa funktiota. Mikäli tulos on kova päätös, niin neuronin ulostulot voivat saada arvoja -1 tai 1. Mikäli tulos on pehmeä päätös, niin neuronin ulostulo voi olla liukuluku. Vastaavasti mikäli vastaanottimen demodulaattori tuottaa pehmeitä bittipäätöksiä, niin neuronin sisäänmenoissa 800 on liukulukuja, ja mikäli demodulaattori tuottaa kovia bittipäätöksiä, niin neuronin sisäänmenoissa 800 on bittejä. Jos molemmissa neuronin sisäänmenoista on bittejä, niin sisäänmenojen välinen kerronta voidaan toteuttaa yksinkertaisesti digitaalitekniikan keinoin.

Neuroni käsittää keksinnön eräässä edullisessa toteutusmuodossa kohinageneraattorin 812, jossa generoitu kohina viedään summaimelle 806. Jossa se lisätään summasignaaliin. Generoitavan kohinan varianssi pienenee neuroverkon stabiloitumisen aikana, kuten aiemmin on kuvattu. Kohina voi olla Gaussin kohinaa tai binääristä kohinaa. Binäärinen kohina on helpompi toteuttaa, mutta toisaalta Gaussin kohinanäytteitä voidaan tallettaa sopiva määrä muistielementtiin ja käyttää tätä kohinaa uudelleen. Kohinan generointi voidaan toteuttaa alan ammattimiehelle tunnetuilla tavoilla.

Keksinnön mukainen dekooderi on mahdollista rakentaa helposti puolijohdetekniikalla, sillä neuroverkon neuronit ovat rakenteeltaan hyvin samankaltaisia keskenään, ainoastaan sisäänmenojen kytkennät vaihtelevat. Täten suurenkin verkon suunnittelu ja toteutus vaatii melko vähäisen työmäärän. Valmiin piirin testaus on myös yksinkertaista toteuttaa. Ratkaisu voidaan myös toteuttaa edullisesti VLSI-piirinä ja siten se on nopea. On myös huomattava, että vaikka keksinnön mukainen dekooderi on rakenteeltaan yksinkertainen ja helppo toteuttaa, niin suorituskyvyltään se on lähellä teoreettista maksimia.

Vaikka keksintöä on edellä selostettu viitaten oheisten piirustusten mukaiseen esimerkkiin, on selvää, ettei keksintö ole rajoittunut siihen, vaan sitä voidaan muunnella monin tavoin oheisten patenttivaatimusten esittämän keksinnöllisen ajatuksen puitteissa.



Patenttivaatimukset

1. Järjestely konvoluutiokoodatun signaalin dekodeeraamiseksi, joka signaali käsittää koodisanoja ja joka järjestely käsittää neuroverkon, joka käsittää joukon neuroneita, jotka käsittävät joukon sisäänmenoja ja ulostulon, ja joiden neuronien sisäänmenoihin on kytketty vastaanotetut koodisanat (800), ja joka järjestely käsittää välineet (806) yhdistää osa neuronin sisäänmenoista neuronissa, t u n n e t t u siitä, että neuronin sisäänmenoihin on takaisinkytketty osa neuroverkon neuronien ulostulosignaaleista (802) ja että neuroni käsittää välineet (804) kertoa ainakin osa neuronin sisäänmenoista keskenään ennen yhdistelyvälineitä (806) ja että ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaali käsittää estimaatin dekodatusta symbolista.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestely, t u n n e t t u siitä, että neuroni käsittää välineet (806) kertoa ainakin osa neuronin sisäänmenoista keskenään sekä vaihtaa tulon etumerkin ennen yhdistelyvälineitä (804).

3. Patenttivaatimuksen 2 mukainen järjestely, t u n n e t t u siitä, että järjestely käsittää siirtorekisterin (714), jonka sisäänmenona on vastaanotetut koodisanat, ja joka siirtorekisteri on toiminnallisesti kytketty neuroverkon neuroneiden sisäänmenoihin, ja puskurimuistin (720), jonka sisäänmenona on neuroneiden ulostulot ja jonka puskurimuistin ulostulo on toiminnallisesti kytketty neuroverkon neuroneiden sisäänmenoihin.

4. Patenttivaatimuksen 3 mukainen järjestely, t u n n e t t u siitä, että järjestely käsittää välineet (228, 726) ohjata siirtorekisteriin (714) vastaanotettu koodisanajoukko, asettaa neuroneihin alkuarvot ja ohjata dekodatun symbolin estimaatti verkon ulostuloon verkon saavutettua tasapainotilan, päivittää siirtorekisterissä olevaa koodisanajoukkoa, ja toistaa yllä kuvattua toimintaa, kunnes haluttu määrä koodisanoja on dekodattu.

5. Patenttivaatimuksen 2 mukainen järjestely, t u n n e t t u siitä, että neuroni käsittää välineet (812) lisätä yhdistelyvälineissä yhdistelyn tulokseen kohinaa.

6. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestely, t u n n e t t u siitä, että usean ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaali käsittää estimaatin vastaavasta määrästä dekodattuja symboleita.

7. Menetelmä konvoluutiokoodatun signaalin dekodeeraamiseksi, joka signaali käsittää koodisanoja ja jossa menetelmässä dekodeaus suoritetaan keinotekoisien neuroverkon avulla, joka neuroverkko käsittää joukon neuroneita, jotka käsittävät joukon sisäänmenoja ja ulostulon, ja että neuronin si-

säänmenoihin ohjataan vastaanotettu koodisanajoukko (800) siirtorekisterin (714) avulla, ja jossa neuronissa yhdistetään osa neuronin sisäänmenoista, t u n n e t t u siitä, että

5 takaisinkytketään kunkin neuronin sisäänmenoihin osa neuroverkon neuronien ulostulosignaaleista (802) ja että ainakin osa neuronin sisäänmenoista kerrotaan keskenään ennen yhdistelemistä ja että

asetetaan neuroneihin alkuarvot ja annetaan verkon asettua tasapainotilaan,

10 ohjataan dekodatun symbolin estimaatti ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaalista verkon ulostuloon verkon saavutettua tasapainotilan, päivitetään siirtorekisterissä olevaa koodisanajoukkoa, ja toistetaan yllä kuvattua neljää askelta kunnes haluttu määrä koodisanoja on dekodattu.

8. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, 15 että ainakin osa neuronin sisäänmenoista kerrotaan neuronissa keskenään sekä vaihdetaan tulon etumerkki ennen yhdistelyä.

9. Patenttivaatimuksen 8 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että neuronin sisäänmenojen yhdistämisen yhteydessä yhdistelyn tulokseen lisätään kohinaa.

20 10. Patenttivaatimuksen 9 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että kohinaa lisätään siten, että kohinan varianssi lähestyy nolaa verkon lähestyessä tasapainotilaa.

11. Patenttivaatimuksen 8 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, 25 että verkon annetaan asettua tasapainotilaan ennalta määrätyn ajanjakson verran.

12. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että verkon annetaan asettua tasapainotilaan niin kauan kunnes neuronien ulostulosignaalien arvot eivät enää vaihtele.

13. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, 30 että neuronin sisäänmenojen yhdistämisen jälkeen signaali syötetään aktivaatiofunktiolle, jonka ulostulosta saadaan neuronin ulostulosignaali.

14. Patenttivaatimuksen 13 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että aktivaatiofunktio tekee yhdistellystä signaalista kovan bittipäätöksen.

15. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, 35 että aktivaatiofunktio tekee yhdistellystä signaalista pehmeän bittipäätöksen.



16. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että ohjataan dekodatun symbolin estimaatti usean ennalta määrätyn neuronin ulostulosignaalia verkon ulostuloon verkon saavutettua tasapainotilan, ja että päivitetään siirtorekisterissä olevaa koodisanajoukkoa samalla ennalta määrättyllä määrällä koodisanoja.

17. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että dekodattava signaali on punkturoitu signaali.

18. Patenttivaatimuksen 8 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että neuronin sisäänmenojen kertominen riippuu signaalin koodauksessa käytetystä konvoluutiokoodista.

19. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että dekodaus suoritetaan usean rinnakkaisen neuroverkon avulla, ja että rinnakkaisten neuroverkkojen ulostuloista valitaan paras estimaatti kulloinkin dekodatuksi bitiksi.

20. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että rinnakkaisten neuroverkkojen ulostuloista valitaan kulloinkin dekodatuksi bitiksi se arvo, joka esiintyy useimmissa ulostuloissa.

21. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että rinnakkaisten neuroverkkojen ulostuloista valitaan kulloinkin dekodatuksi bitiksi se arvo, joka uudelleenkoodauksen avulla osoittautuu oikeaksi.

22. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että dekodattaessa konvoluutiokoodia, jonka koodaussuhde on $\frac{1}{2}$ ja koodaussyvyys 3 neuroverkon neuronin S_k sisäänmenot, takaisinkytkennät ja kertomisoperaatiot rakennetaan kaavan

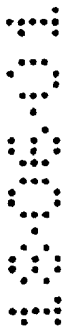
$$S_k = f_a(-I_{k,1}S_{k-2} + I_{k,2}S_{k-1}S_{k-2} + I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+2,1}S_{k+2} + I_{k+2,2}S_{k+1}S_{k+2} + \text{AWGN}).$$

mukaan, jossa f_a on haluttu aktivaatiofunktio, I_i on sisääntulevat koodisanat ja S_i on takaisinkytkennät muista neuroneista, ja AWGN on kohinaa, jonka varianssi pienenee verkon stabiloitumisen aikana.

23. Patenttivaatimuksen 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että dekodattaessa konvoluutiokoodia, jonka koodaussuhde on $\frac{1}{2}$ ja koodaussyvyys 9 neuroverkon neuronin S_k sisäänmenot, takaisinkytkennät ja kertomisoperaatiot rakennetaan kaavan

$$\begin{aligned}
S_k = f_a & (-I_{k,1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-5}S_{k-6}S_{k-7}S_{k-8} \\
& - I_{k,2}S_{k-1}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-7}S_{k-8} + I_{k,3}S_{k-1}S_{k-2}S_{k-5}S_{k-8} \\
& - I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-6}S_{k-7} + I_{k+1,3}S_{k+1}S_{k-1}S_{k-4}S_{k-7} \\
& + I_{k+2,1}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-5}S_{k-6} + I_{k+2,3}S_{k+2}S_{k+1}S_{k-3}S_{k-6} \\
& + I_{k+3,1}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-5} - I_{k+3,2}S_{k+3}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-4}S_{k-5} \\
& - I_{k+4,2}S_{k+4}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-3}S_{k-4} + I_{k+5,1}S_{k+5}S_{k+3}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-2}S_{k-3} \\
& + I_{k+5,3}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+3}S_{k-3} + I_{k+6,1}S_{k+6}S_{k+4}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-1}S_{k-2} \\
& + I_{k+7,1}S_{k+7}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+7,2}S_{k+7}S_{k+6}S_{k+4}S_{k+3}S_{k-1} \\
& + I_{k+8,1}S_{k+8}S_{k+6}S_{k+5}S_{k+3}S_{k+2}S_{k+1} - I_{k+8,2}S_{k+8}S_{k+7}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+1} \\
& + I_{k+8,3}S_{k+8}S_{k+7}S_{k+6}S_{k+3} + \text{AWGN}.
\end{aligned}$$

mukaan, jossa f_a on haluttu aktivaatiofunktio, I_i on sisääntulevat koodisanat ja S_i on takaisinkytkennät muista neuroneista, ja AWGN on kohinaa, jonka varianssi pienenee verkon stabiloitumisen aikana.



Patentkrav

1. Arrangemang för dekodning av en konvolutionskodad signal som omfattar kodord och vilket arrangemang omfattar ett neuronnät som omfattar ett antal neuroner omfattande ett antal ingångar och en utgång, och de mottagna kodorden (800) är kopplade till neuronernas ingångar och vilket arrangemang omfattar medel (806) för sammankoppling av en del av neuronernas ingångar i neuronerna, k ä n n e t e c k n a t av att en del av utgångssignalerna (802) för neuronnätets neuroner är återkopplade till neuronens ingångar och att neuronerna omfattar medel (804) för multiplicering av åtminstone en del av neuronens ingångar sinsemellan före sammankopplingsmedlen (806) och att utgångssignalen för en förutbestämd neuron omfattar ett estimat av en dekodad symbol.

2. Arrangemang enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t av att neuronerna omfattar medel (806) för multiplicering av åtminstone en del av neuronens ingångar sinsemellan samt för byte av produktens förtecken före sammankopplingsmedlen (804).

3. Arrangemang enligt patentkrav 2, k ä n n e t e c k n a t av att arrangemanget omfattar ett skiftregister (714) med de mottagna kodorden som en ingång och vilket skiftregister är funktionellt kopplat till ingångarna för neuronnätets neuroner och ett buffertminne (720) med neuronernas utgångar som en ingång och vars buffertminnes utgång är funktionellt kopplad till ingångarna för neuronnätets neuroner.

4. Arrangemang enligt patentkrav 3, k ä n n e t e c k n a t av att arrangemanget omfattar medel (228, 726) för att styra den mottagna kodordsgruppen till skiftregistret (714), för att sätta begynnelsevärden för neuronerna och för att styra estimatet för den dekodade symbolen till nätets utgång efter att nätet uppnått ett jämviktsläge, för att uppdatera kodordsgruppen i skiftregistret och för att upprepa ovan beskrivna verksamhet tills ett önskat antal kodord är dekodade.

5. Arrangemang enligt patentkrav 2, k ä n n e t e c k n a t av att neuronerna omfattar medel (812) för att i sammankopplingsmedlen tillägga brus till resultatet av sammankopplingen.

6. Arrangemang enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t av att utgångssignalen för flera förutbestämda neuroner omfattar ett estimat av ett motsvarande antal dekodade symboler.

7. Förfarande för dekodning av en konvolutionskodad signal som omfattar kodord och i vilket förfarande dekodningen utförs med hjälp av ett artificiellt neuronät, som omfattar ett antal neuroner omfattande ett antal ingångar och en utgång och att den mottagna kodordsgruppen (800) styrs till
 5 neuronens ingångar med hjälp av ett skiftregister (714) och i vilken neuron en del av neuronens ingångar sammankopplas, k ä n n e t e c k n a t av att

en del av ingångssignalerna (802) för neuronätets neuroner återkopplas till respektive neurons ingångar och att åtminstone en del av neuronens ingångar multipliceras sinsemellan före sammankopplingen och att

10 begynnelsevärden ställs för neuronerna och nätet tillåts uppnå ett jämviktssläge,

ett estimat för den dekodade symbolen styrs från utgångssignalen för en förutbestämd neuron till nätets utgång efter att nätet uppnått jämviktssläge,

15 kodordsgruppen i skiftregistret uppdateras och ovan beskrivna fyra steg upprepas tills ett önskat antal kodord är dekodade.

8. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t av att åtminstone en del av neuronens ingångar multipliceras sinsemellan i neuronerna samt av att produktens förtecken byts före sammankopplingen.
 20

9. Förfarande enligt patentkrav 8, k ä n n e t e c k n a t av att i samband med sammankopplingen av neuronens ingångar tilläggs brus till resultatet av sammankopplingen.

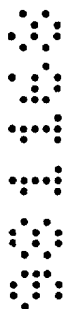
10. Förfarande enligt patentkrav 9, k ä n n e t e c k n a t av att brus
 25 tilläggs så att brusets varians närmar sig noll när nätet närmar sig jämviktssläge.

11. Förfarande enligt patentkrav 8, k ä n n e t e c k n a t av att nätet tillåts sätta sig i jämviktssläget för en förutbestämd tidsperiod.

12. Förfarande enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t av att nätet
 30 tillåts sätta sig i jämviktssläget tills värdena för neuronernas utgångssignaler inte varierar längre.

13. Förfarande enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t av att efter sammankopplingen av neuronens ingångar matas signalen till en aktiveringsfunktion från vars utgång neuronens utgångssignal erhålls.

35 14. Förfarande enligt patentkrav 13, k ä n n e t e c k n a t av att aktiveringsfunktionen fattar ett hårt bitbeslut från den sammankopplade signalen.



15. Förfarande enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a t av att aktiveringsfunktionen fattar ett mjukt bitbeslut från den sammankopplade signalen.

16. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t av att estimatet för den dekodade signalen styrs från utgångssignalen för flera förutbestämde neuroner till nätets utgång när nätet uppnått jämviktsläget och att kodordsgruppen i skiftregistret uppdateras med samma förutbestämde antal kodord.

17. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t av att signalen som dekodas är en punkterad signal.

18. Förfarande enligt patentkrav 8, k ä n n e t e c k n a t av att multiplikationen av neuronens ingångar beror på den konvolutionskod som används vid kodning av signalen.

19. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t av att dekodning utförs med hjälp av flera parallella neuronnät och att det bästa estimatet väljs från de parallella neuronnätets utgångar som den dekodade biten vid respektive tillfälle.

20. Förfarande enligt patentkrav 19, k ä n n e t e c k n a t av att värdet som förekommer i de flesta utgångarna väljs från de parallella neuronnätets utgångar som den dekodade biten vid respektive tillfälle.

21. Förfarande enligt patentkrav 19, k ä n n e t e c k n a t av att värdet som med hjälp av återkodning visar sig vara rätt väljs från de parallella neuronnätets utgångar som den dekodade biten vid respektive tillfälle.

22. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t av att vid kodning av en konvolutionskod med kodförhållandet $\frac{1}{2}$ och koddjupet 3 konstrueras ingångarna för neuronnätets neuron S_k , återkopplingar och multiplikationer enligt formeln

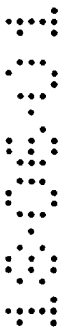
$$S_k = f_a(-I_{k,1}S_{k-2} + I_{k,2}S_{k-1}S_{k-2} + I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+2,1}S_{k+2} + I_{k+2,2}S_{k+1}S_{k+2} + \text{AWGN}).$$

där f_a är den önskade aktiveringsfunktionen, I_i betecknar de inkommande kodorden och S_j betecknar återkopplingar från andra neuroner och AWGN är brus vars varians minskar under stabiliseringen av nätet.

23. Förfarande enligt patentkrav 7, k ä n n e t e c k n a t av att vid kodning av en konvolutionskod med kodförhållandet $\frac{1}{2}$ och koddjupet 9 konstrueras ingångarna för neuronnätets neuron S_k , återkopplingar och multiplikationer enligt formeln

$$\begin{aligned}
S_k = f_a &(-I_{k,1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-5}S_{k-6}S_{k-7}S_{k-8} \\
&- I_{k,2}S_{k-1}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-7}S_{k-8} + I_{k,3}S_{k-1}S_{k-2}S_{k-5}S_{k-8} \\
&- I_{k+1,2}S_{k+1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-6}S_{k-7} + I_{k+1,3}S_{k+1}S_{k-1}S_{k-4}S_{k-7} \\
&+ I_{k+2,1}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-5}S_{k-6} + I_{k+2,3}S_{k+2}S_{k+1}S_{k-3}S_{k-6} \\
&+ I_{k+3,1}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-2}S_{k-3}S_{k-4}S_{k-5} - I_{k+3,2}S_{k+3}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-4}S_{k-5} \\
&- I_{k+4,2}S_{k+4}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-3}S_{k-4} + I_{k+5,1}S_{k+5}S_{k+3}S_{k+2}S_{k-1}S_{k-2}S_{k-3} \\
&+ I_{k+5,3}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+3}S_{k-3} + I_{k+6,1}S_{k+6}S_{k+4}S_{k+3}S_{k+1}S_{k-1}S_{k-2} \\
&+ I_{k+7,1}S_{k+7}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+2}S_{k+1}S_{k-1} - I_{k+7,2}S_{k+7}S_{k+6}S_{k+4}S_{k+3}S_{k-1} \\
&+ I_{k+8,1}S_{k+8}S_{k+6}S_{k+5}S_{k+3}S_{k+2}S_{k+1} - I_{k+8,2}S_{k+8}S_{k+7}S_{k+5}S_{k+4}S_{k+1} \\
&+ I_{k+8,3}S_{k+8}S_{k+7}S_{k+6}S_{k+3} + \text{AWGN}.
\end{aligned}$$

där f_a är den önskade aktiveringsfunktionen, I_i betecknar de inkommande kodorden och S_i betecknar återkopplingar från andra neuroner och AWGN är brus vars varians minskar under stabiliseringen av nätet.



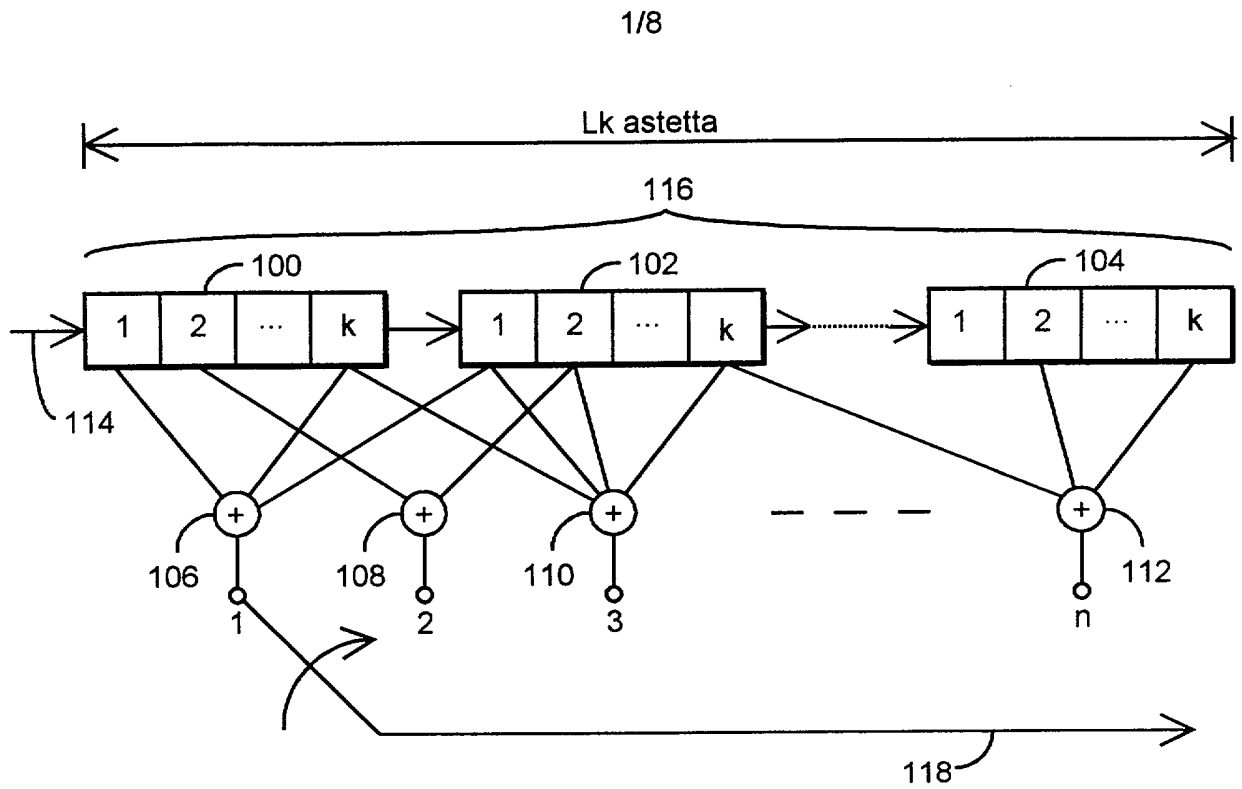


Fig. 1

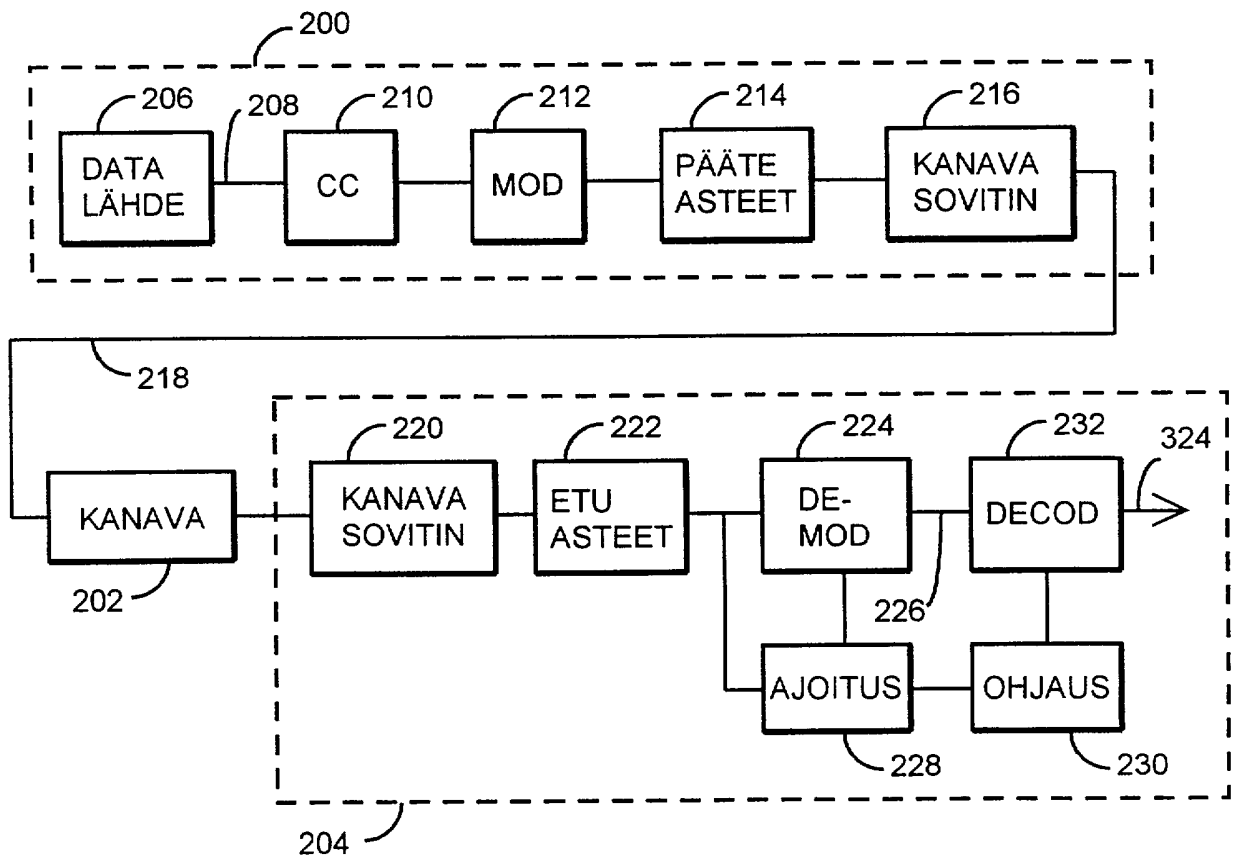
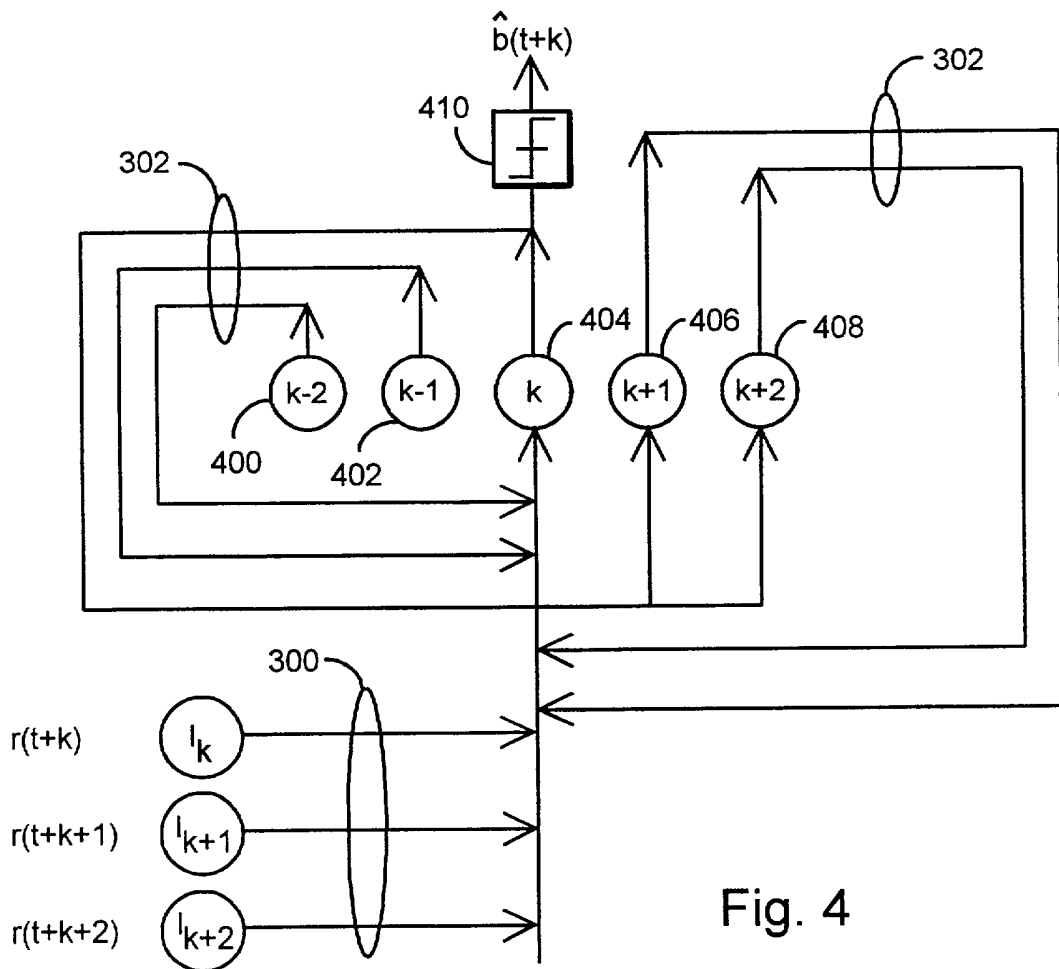
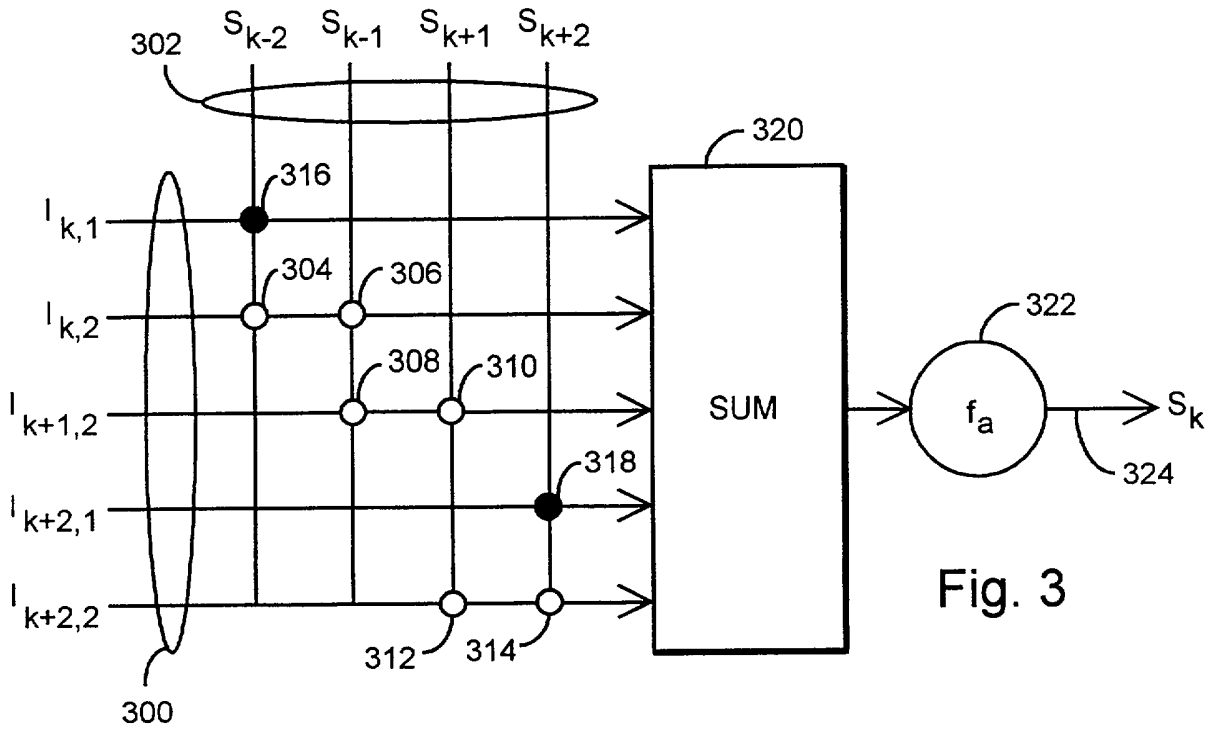


Fig. 2



3/8

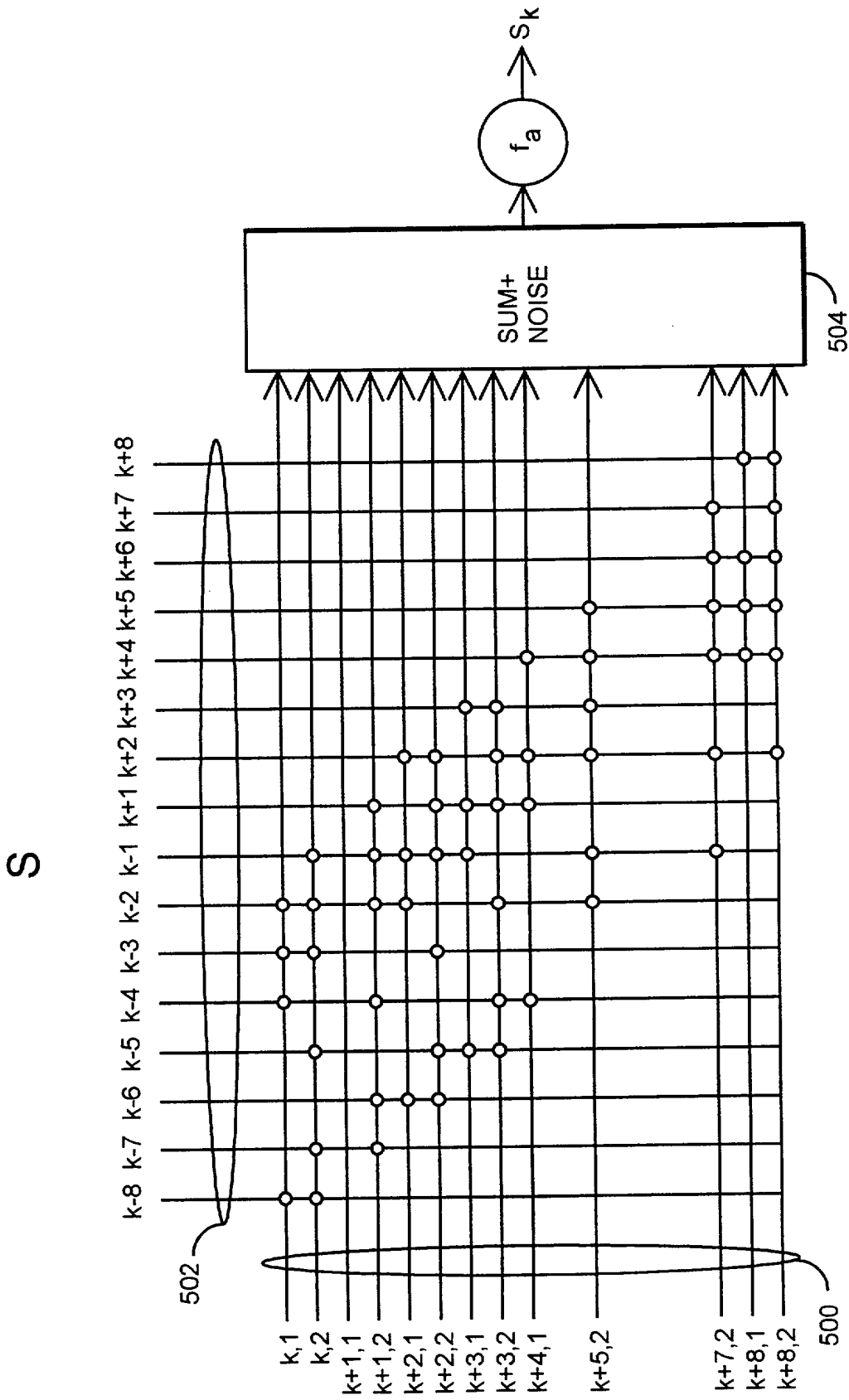


Fig. 5

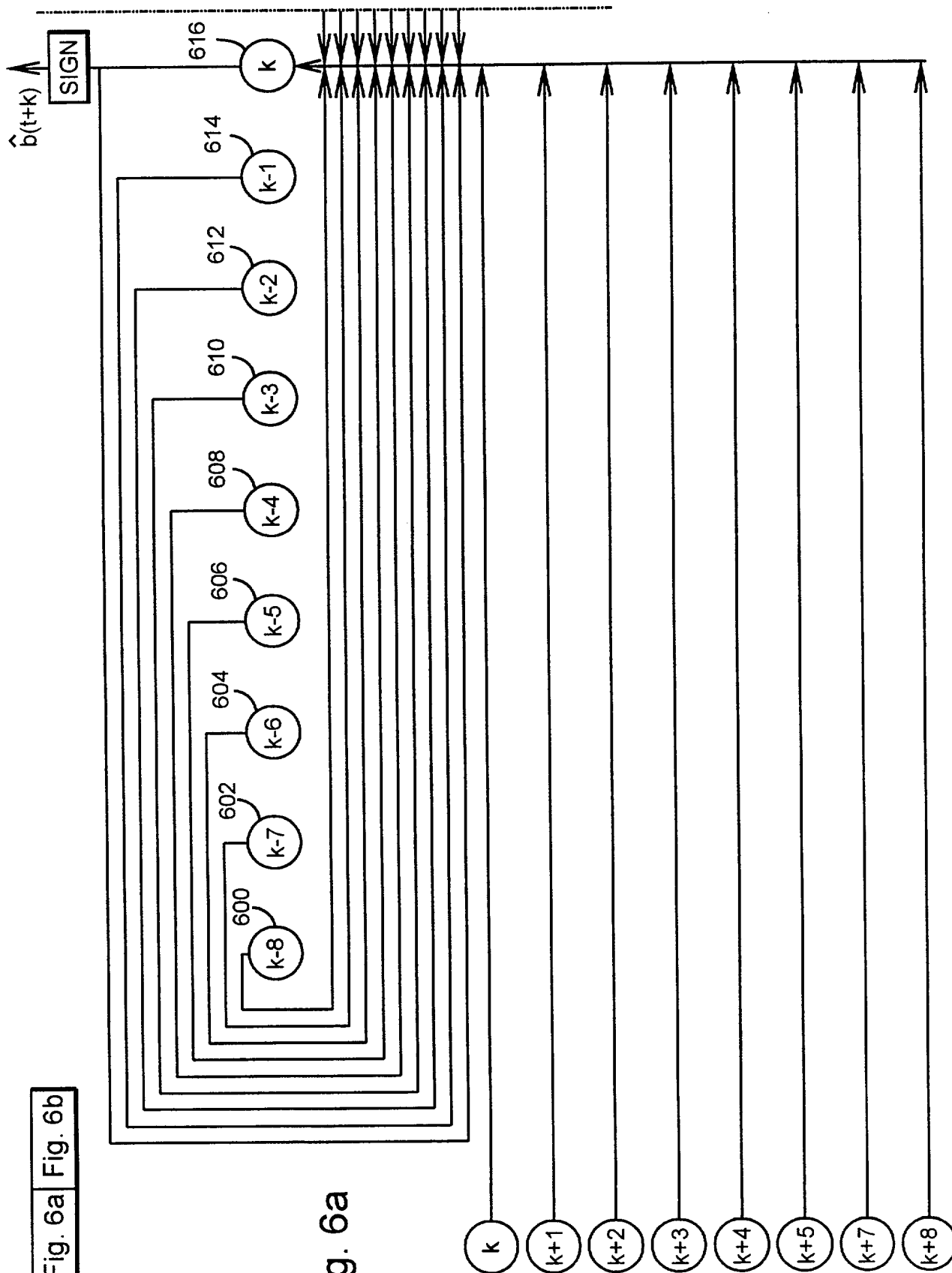


Fig. 6 Fig. 6a Fig. 6b

Fig. 6a



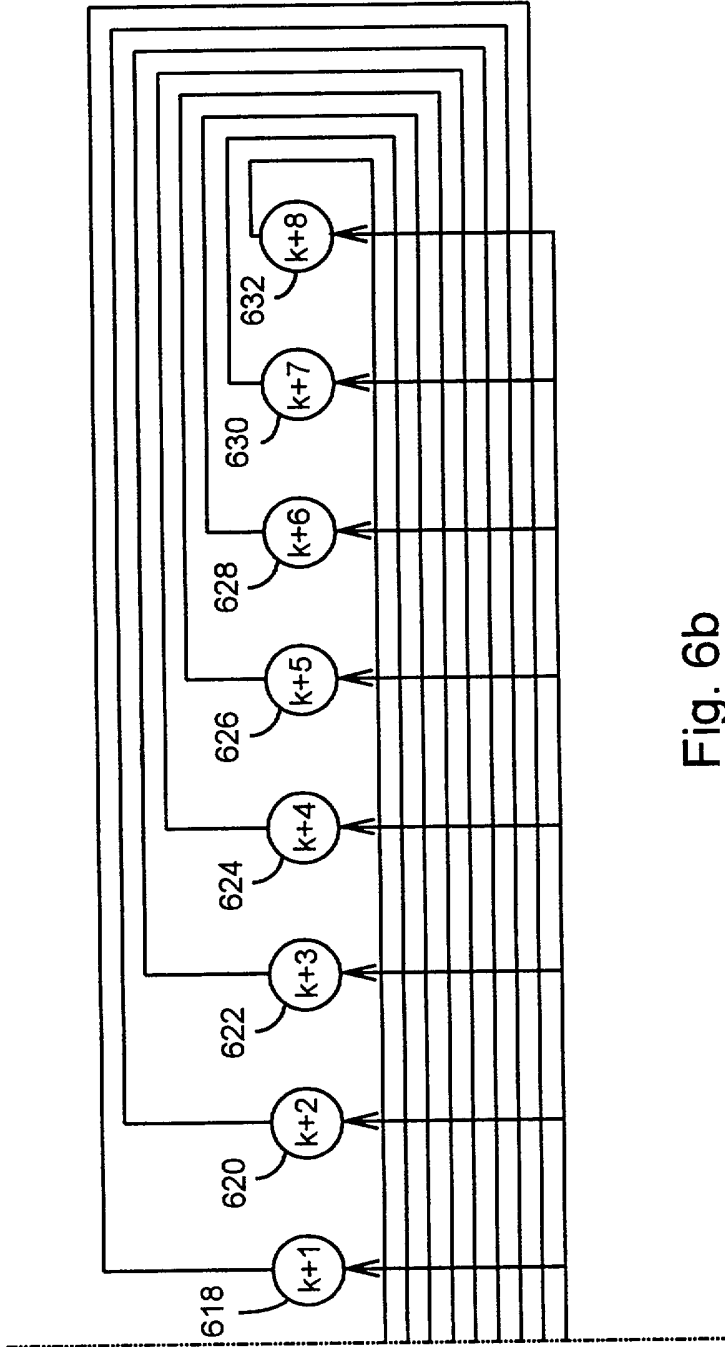


Fig. 6b

100601 881166

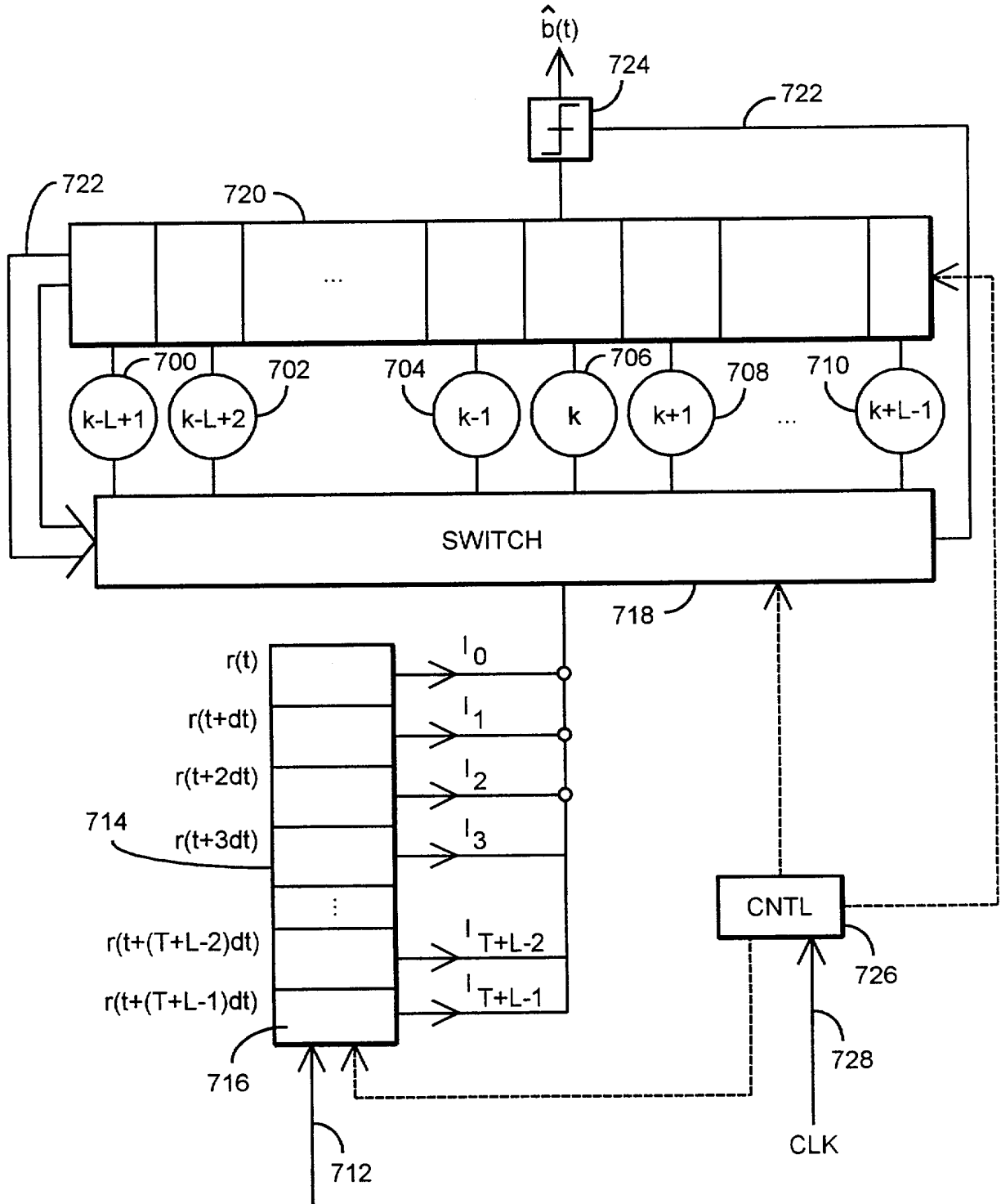


Fig. 7a

7/8

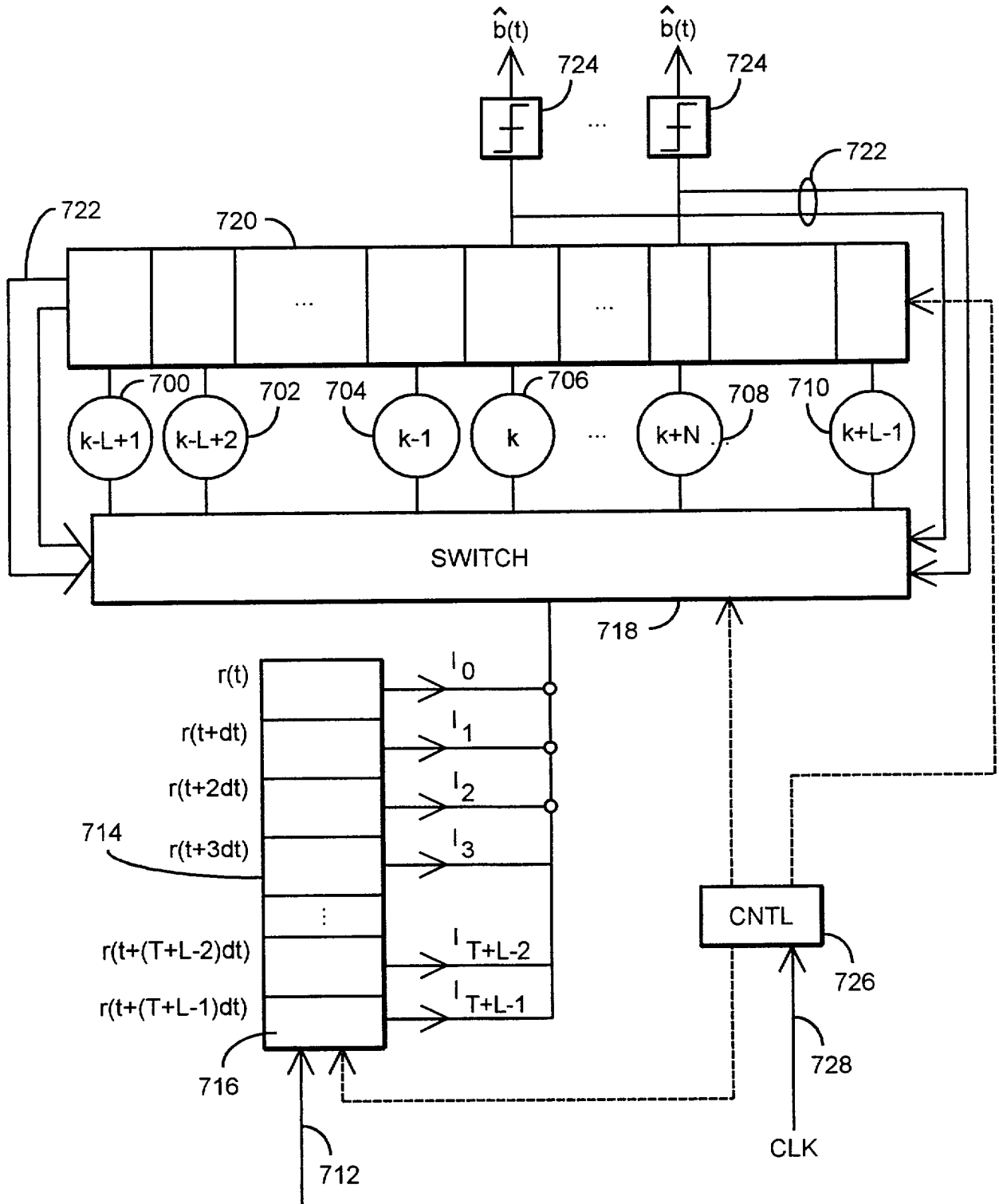


Fig. 7b

