

Rádio Difusão Digital utilizando códigos pseudo-aleatórios e seu uso em Rádios Comunitárias.

Fabrizio de Araújo Carvalho e Fernando Walter

Resumo—Uma proposta de rádio digital que explora as vantagens dos códigos pseudo-aleatórios é apresentada. A proposta sugere um transmissor e seu dual receptor capaz de reutilizar faixas do espectro de frequência através das tecnologias de processamento digital de sinais. Este trabalho propõe um sistema de comunicação que possibilite uma rádio de difusão com as seguintes características: menor potência de transmissão; canais alternativos; e não interferir em outros serviços, além de poder agregar serviços como o posicionamento em duas ou três dimensões.

Palavras-Chave—Rádio Difusão Digital, CDMA, Eficiência Espectral, Posicionamento por triangulação.

Abstract— A digital radio broadcast system that explores the advantages of pseudo-random codes is presented. In this way the transmitted signals can be allocated on the frequency spectrum bands already used for other services. The use of pseudo-random codes enables a radio broadcast with the following characteristics: low power transmitters; greater number of radios in the same frequency; more robust against interferences to and from other stations; and with the possibility of positioning services in two and three dimensions.

Keywords— Digital Radio Broadcasting, CDMA, Spectral Efficiency, Positioning by triangulation method.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento do ambiente que nos cerca e as informações geradas a partir dele são vitais para a sobrevivência do ser humano e da sociedade em que vivemos. Este é fruto das experiências vividas e racionalizadas por indivíduos, mas é a capacidade de se comunicar que permitiu a sua transferência entre membros de diferentes grupos, fazendo com que se somem às experiências dos demais.

A transferência do conhecimento garante a sua elaboração, o seu aprimoramento, bem como a sua manutenção ao longo dos anos. Qual a pessoa consciente de um problema em comum, não compartilha com o vizinho ou alerta-o sobre um perigo? Portanto, as dificuldades e os obstáculos existentes na nossa forma de viver aguçam nosso raciocínio e as respostas para os problemas são transmitidas aos demais. O conhecimento, fruto dos sentidos, do raciocínio e da comunicação, é um processo acumulativo.

Dessa análise superficial das habilidades e do comportamento de nossa espécie podemos identificar a comunicação como uma necessidade básica. O crescimento exponencial do conhecimento, sobre tudo aquilo que nos afeta direta ou indiretamente, exigiram novos meios de comunicação.

A informação se propaga pela comunicação verbal, visual

e se perpetuam nos livros, nas imagens, desenhos, pinturas e na memória dos indivíduos. No decorrer dos séculos, os avanços tecnológicos resultaram na expansão dos meios de comunicação; nos atuais sistemas e aparelhos de comunicação, a informação se propaga através de ondas eletromagnéticas e sendo armazenados, nas últimas décadas, em arquivos digitais.

Hoje, não apenas os homens se comunicam, mas também as máquinas adquiriram também essa habilidade. Sistemas relativamente tradicionais, como os sistemas de telefonia, redes de computadores e as de TV a cabo/satélite passam por um período de convergência e interatividade. Muitas empresas já oferecem esse conjunto de serviços. Computadores, celulares, vídeos-game, PDAs (*Personal Digital Assistants*), satélites em todo o mundo formam uma grande rede de comunicação, permitindo uma difusão global dos conhecimentos.

Nesse contexto, o espectro de frequência utilizado por todos estes agentes de comunicação tornou-se um recurso natural escasso.

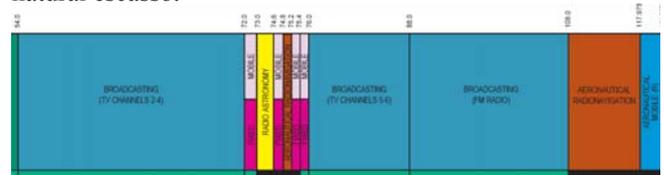


Fig. 1. Alocação de Frequências: 54,0 – 117,975 MHz (Fonte: *National Telecommunications and Information Administration*, <http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.html>).

As faixas de frequências nas comunicações são alocadas de acordo com o tipo de aplicação e o meio de transmissão utilizado.

Ao observarmos o espectro útil das frequências (Fig. 1), podemos constatar escassez de faixas disponíveis frente à demanda por novos serviços.

A demanda crescente por novos canais de comunicação exige uma busca contínua por novas tecnologias. O Ministério das Comunicações, desde 2005, juntamente com algumas universidades federais, está testando e avaliando alguns sistemas de rádio digital disponíveis atualmente no mundo. Neste contexto, o Ministério abriu chamada pública para envio de novas propostas e de avaliações dos sistemas de rádio digitais já existentes.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

As atuais rádios analógicas AM e FM são vistas, em geral, como um canal de entretenimento, mas são também importantes nos diversos âmbitos da vida em comunidade.

Neste contexto, a rádio comunitária, de menor potência; utilizada nos bairros, é uma importante ferramenta para integração e desenvolvimento social à medida que possibilita a união de seus ouvintes em torno das necessidades de seu

bairro. A conscientização dos problemas vigentes motiva os agentes sociais a encontrar as soluções mais adequadas aos interesses comuns. A rádio difusão de bairro promove o bom desenvolvimento sócio ambiental e por consequência a melhoria dos índices de qualidade da região. Um dos problemas para a maior penetração destas rádios está na escassez de canais disponíveis, o que resulta no surgimento das rádios clandestinas (“piratas”).

Na aviação, as rádios clandestinas por sua vez freqüentemente prejudicam a comunicação piloto e torre. Este problema é enfrentado durante a etapa de aproximação nos aeroportos. Hoje a forma de comunicação torre-avião é através da transmissão de sinais em FM. O receptor FM apresenta característica conhecida como efeito de captura. Esse efeito ocorre quando existem mais sinais transmitidos na mesma freqüência de portadora, neste caso, o receptor FM irá responder ao sinal de maior potência e ignorar os demais. Neste contexto, a rádio difusão com o emprego de códigos pseudo-aleatórios é capaz de oferecer um canal de comunicação sem interferir na do piloto com a torre de controle dos aeroportos.

A recepção de sinais de emissoras de rádio difusão com códigos pseudo-aleatório (PRN) distintos, além de uma comunicação segura, permite oferecer serviços de posicionamento precisos e complementares aos dos sistemas globais de posicionamento (GNSS – o GPS, o GLONASS e o Galileo).

A necessidade de comunicação e de posicionamento, também existe para as empresas de transporte (rodoviário e ferroviário). Desta maneira o centro de informação das companhias nas rodoviárias poderá fornecer informações sobre possíveis atrasos de seus veículos e de sua localização. Para o transporte de carga nossas empresas dependem basicamente do sistema de posicionamento americano, GPS e/ou o europeu, Galileo.

III. RÁDIO DIGITAL

Os códigos pseudo-aleatórios (PRN) são empregados em diversos sistemas de comunicação para permitir acesso ao meio de múltiplos canais utilizando a mesma freqüência de portadora. Esta técnica de compartilhamento da freqüência é conhecida como CDMA e é amplamente utilizada nos sistemas de comunicação móveis.

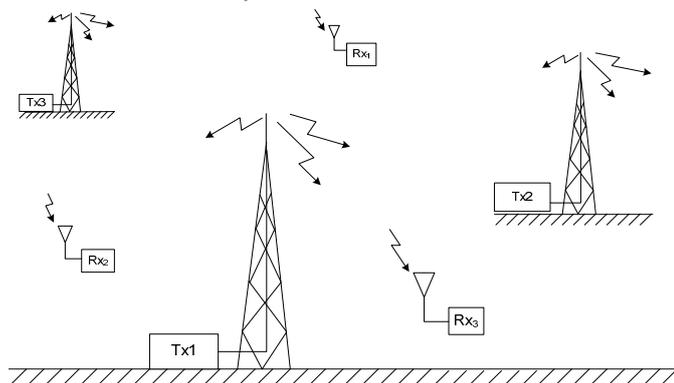


Fig. 2. Rádio Difusão Digital.

Os códigos PRN são também utilizados no campo de posicionamento por satélite e da navegação para determinação da posição, velocidade e tempo do móvel através de um processo conhecido como trilateração. A determinação de posição por triangulação é mais fácil para estes códigos porque o problema da ambigüidade de fase é reduzido, uma vez que

estes apresentam períodos de duração longos. Um dos sistemas mais conhecidos que utiliza este processo é o sistema GPS.

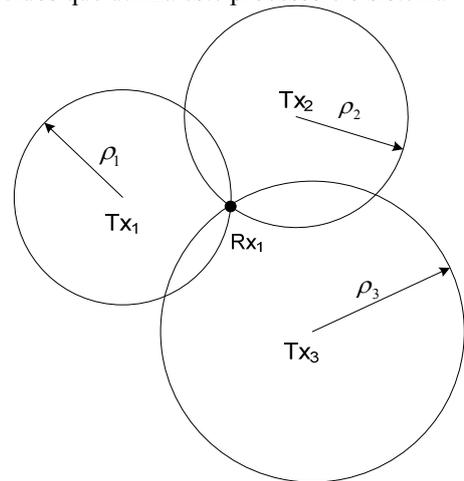


Fig. 3. Rádio Difusão Digital. Processo de triangulação do sinal para determinar a posição do móvel. Baseia-se na medida do tempo de propagação do sinal da estação de Rádio Difusão Tx_N até o receptor. Neste caso é necessário que as emissoras estejam sincronizadas. Este sincronismo pode ser obtido quando cada uma das emissoras for capaz de fazer a leitura de um sinal piloto de suas emissoras vizinhas.

A. Códigos PRN

Os códigos PRNs empregados na rádio são denominados códigos de Gold. Esses são quase ortogonais entre si, havendo, portanto, pouca semelhança entre eles.

São formados por uma seqüência binária de “0s” e “1s”. Nas seqüências pseudo-aleatórias, os bits são denominados de “chips”. O termo chip é usado para distinguir o bit do código do bit de informação. Temos na Eq.1, a representação do código PRN $c_i(t)$ da i -ésima transmissora.

$$c_i(t) = \sum_{l=0}^{N-1} c_{il} \prod \left[\frac{t - lT_{chip}}{T_{chip}} \right], c_{il} = 0 \text{ ou } 1 \quad (1)$$

Onde c_{il} corresponde ao valor do chip (“0” e “1”) para um dado l ; sendo l um contador de 0 à $N-1$; N o número de chips do código e T_{chip} , a duração do chip.

A seqüência $c_i(t)$ é periódica (Eq.2), de período T_p ($N \times T_{chip}$)

$$c_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{N-1} c_{il} \prod \left[\frac{t - lT_{chip} - kT_p}{T_{chip}} \right] \quad (2)$$

A seqüência pode ser convertida para $C_i(t)$, de “1s” e “-1s”, caso a operação de multiplicação seja utilizada na modulação do sinal (Eq.3):

$$C_i(t) = \cos[c_i(t) \cdot \pi] \quad (3)$$

A seqüência é gerada a partir de dois registradores de máximo comprimento, denominados $G1$ e $G2$ (Fig.4). Para seqüência com comprimento de 63 ($= 2^6 - 1$) chips são utilizados registradores com 6 células ou elementos. Ambos os registros são inicializados com 1s (operação módulo 2). Cada registro tem seus valores deslocados segundo um referencial de tempo (10,23 MHz), o qual irá determinar a taxa do chip e consequentemente o período do código.

A Tabela I apresenta os polinômios $G1(t)$ e $G2(t)$ utilizados para combinar o valor entre si presente em cada elemento dos registradores $G1$ e $G2$ através de operações em módulo 2 (\oplus).

TABELA I. POLINÔMIOS GERADORES DE CÓDIGO PRN

| Reg. | Polinômio |
|-------|---|
| G1(t) | $1 \oplus x^1 \oplus x^6$ |
| G2(t) | $1 \oplus x^1 \oplus x^2 \oplus x^5 \oplus x^6$ |

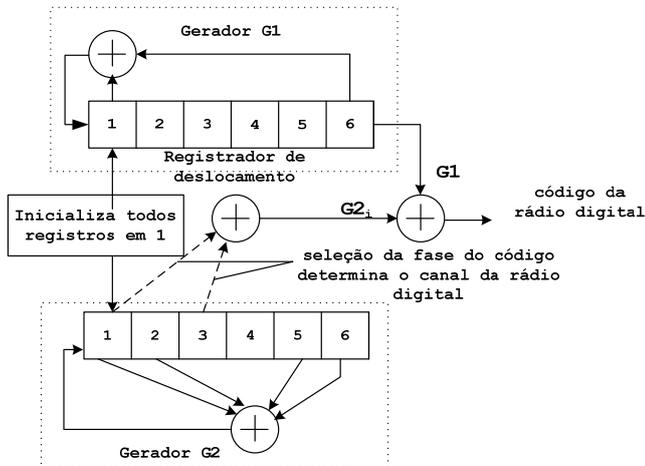


Fig. 4. Gerador de códigos de Gold.

A seqüência PRN determina qual será a estação receptora. A distinção, pelo receptor entre as informações das transmissoras, é feita através de um processo de correlação. A correlação ocorre entre o código contido no sinal recebido e a sua réplica, presente no receptor alvo.

A correlação permite medir o grau de semelhança entre estes sinais através da amplitude de correlação. A amplitude de correlação entre PRNs distintos e ortogonais é aproximadamente igual a zero, $R_{ij}(\tau)$ (correlação cruzada), para qualquer atraso τ (Eq.4).

$$R_{ij}(\tau) = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} C_i(t)C_j(t+\tau)dt \cong 0; p/ \text{qualquer } |\tau| \quad (4)$$

Nesta equação, $C_i(t)$ e $C_j(t)$ são os códigos PRNs para a i-ésima e j-ésima transmissora, respectivamente. Para a autocorrelação (códigos iguais), $R_{ii}(\tau)$, a amplitude é diferente de zero para valores de atraso, τ , menores que um chip; $0 \leq |\tau| \leq T_{chip}$ (Fig. 5):

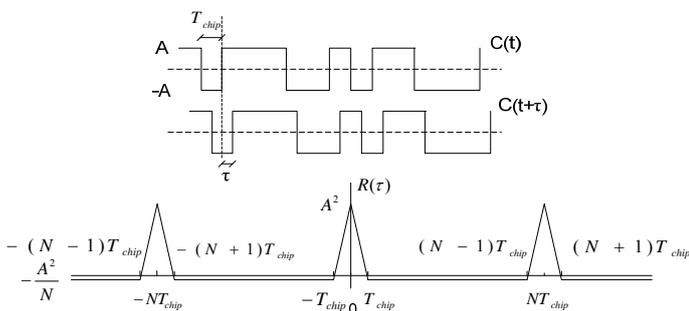


Fig. 5. Processo de autocorrelação de uma seqüência PRN.

Como se observa, os picos de autocorrelação têm a largura de dois chips e se repetem a cada período $T_C (=N \times T_{chip})$ do código. A amplitude aumenta linearmente, desde um chip anterior, até um máximo no alinhamento, decrescendo até zero, um chip após o máximo. Para códigos ortogonais a amplitude, $R_{ij}(\tau)$, será aproximadamente zero para atrasos τ maiores que o chip, (Eq.5).

$$R_{ii}(\tau) = \frac{1}{NT_{chip}} \int_0^{NT_{chip}} C_i(t)C_i(t+\tau)dt = \begin{cases} A^2 \left(1 - \frac{|\tau|}{T_c}\right); & \text{para } |\tau| < T_{chip} \\ \cong 0; & \text{para } |\tau| > T_{chip} \end{cases} \quad (5)$$

A Fig. 6 mostra a seqüência de chips fornecida pelo gerador de códigos PRN (Fig.4).

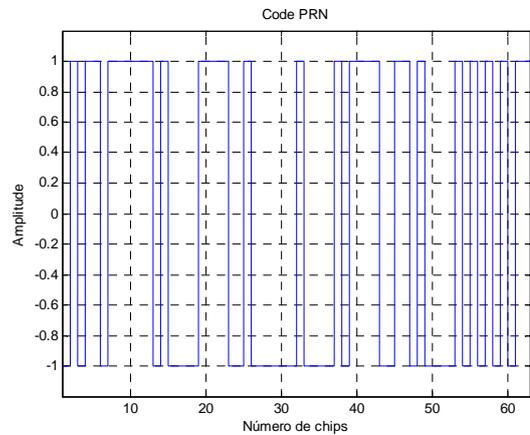


Fig. 6. Seqüência PRN de 63 chips do gerador de códigos Gold.

A autocorrelação para esse código é mostrada na Fig. 7. Nela se observam os valores máximos de amplitude não normalizados [63, 15, -1, -17]. A seqüência foi atrasada de 21 chips apenas para ilustração.

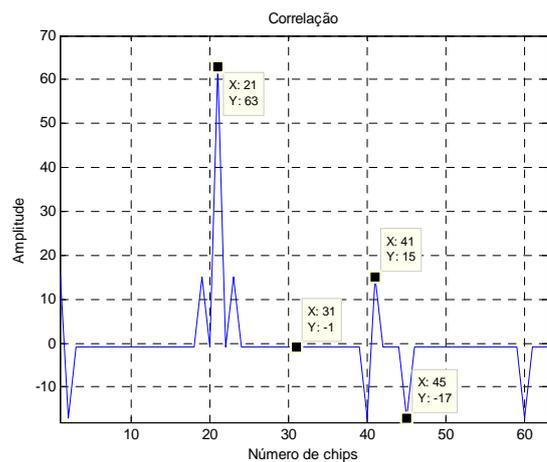


Fig. 7. Autocorrelação do código PRN da Fig.6 com atraso de 21 chips.

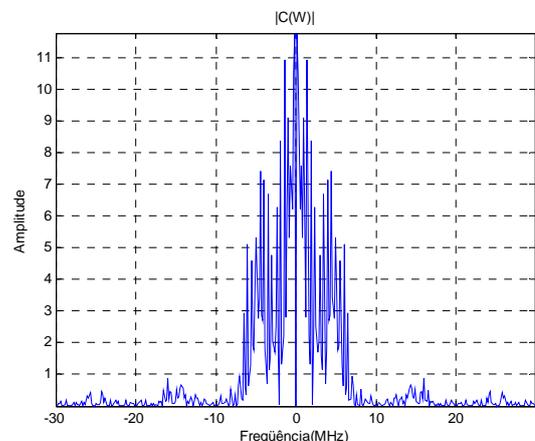


Fig. 8. Espectro de freqüência para o código PRN da Fig.7, já amostrado.

A Fig. 8 mostra o espectro de freqüência da seqüência PRN de 10,23 MHz amostrada com taxa de 60 MHz .

Tanto o transmissor quanto o receptor foram desenvolvidos e codificados em software (Matlab®) para testes de concepção. Sendo os sinais gerados em banda base e na frequência intermediária (FI) utilizando técnicas de processamento de sinais.

B. Transmissor CDMA

O diagrama de blocos da Fig.9 apresenta uma visão geral para o transmissor codificado na banda base e na FI digital. Neste diagrama a informação (sinal de voz) é digitalizada por um conversor A/D. A sequência binária fornecida pelo conversor modula a sequência PRN (em +1 e -1). Está irá transportar a informação. Posteriormente, este sinal é heterodinado para uma FI após a multiplicação por uma portadora digital. Se necessário a taxa de transmissão pode ser aumentada com a adição de outra componente em quadratura.

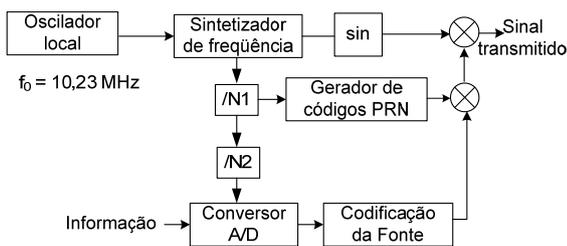


Fig. 9. Diagrama de blocos do transmissor em banda base e na FI digital.

O sinal transmitido é então armazenado em um arquivo binário para ser lido pelo software do receptor.

C. Receptor CDMA

A Figura 10 ilustra através de um diagrama de blocos um receptor CDMA comum.

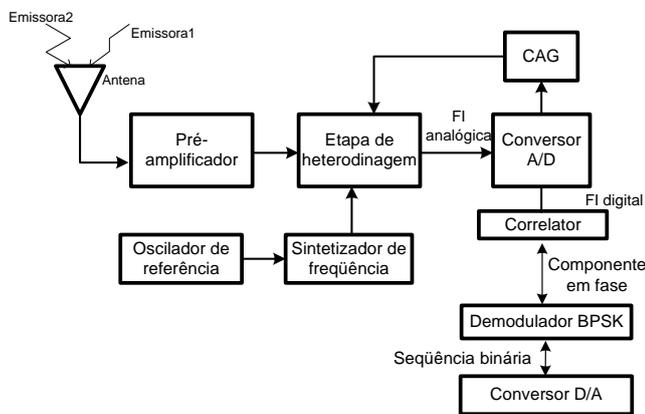


Fig. 10. Receptor de rádio difusão comunitária CDMA

Após a heterodinagem, a FI analógica é amostrada, quantizada e codificada por um conversor A/D. A Figura 11 ilustra a amostragem na frequência f_a (60MHz).

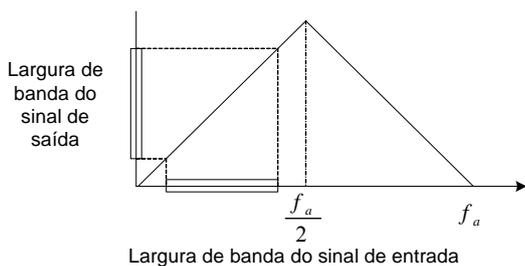


Fig. 11. Processo de amostragem passa-banda.

A saída do conversor é uma FI digital que será processada pelo correlator utilizando técnicas de programação. A Figura 12 mostra, através de um diagrama de blocos, o processo de rastreamento do receptor CDMA [1] [2] [3] [4].

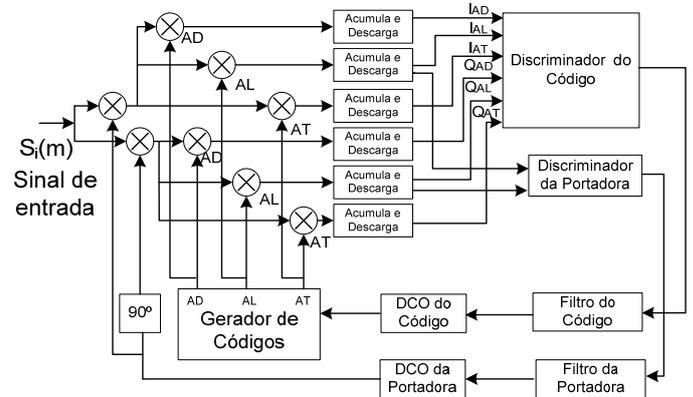


Fig. 12. Etapa de rastreamento e demodulação.

IV. RESULTADOS

A. Transmissor CDMA

O sinal de áudio capturado pelo microfone do computador foi amostrado com taxa de 8 kHz, quantizado e codificado em palavras de 16 bits. Cada bit de informação modula a fase de um código PN em $\pm\pi$ rads. Este, por sua vez, modula a frequência intermediária 10,7 MHz e armazenado no acumulador (“buffer”). O sinal transmitido é um BPSK (Binary Phase Shift Keying). Para sincronismo do bit é transmitido o preâmbulo 101010101010101 para cada cinco amostras do sinal de áudio.

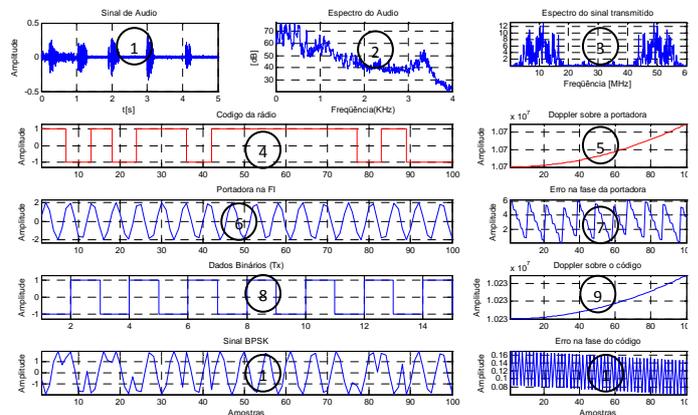


Fig. 13. Transmissor da rádio difusão comunitária CDMA. Interface de acompanhamento.

Para a tela do transmissor temos as seguintes janelas: 1: Sinal de áudio (contagem de 1 a 5); 2: Espectro do sinal de Áudio; 3: Espectro do sinal na FI digital; 4: Código PRN truncado; 5: Doppler sobre a portadora; 6: FI digitalizada; 7: Erro na fase da portadora; 8: Palavra 16 bits (áudio quantificado e codificado); 9: Erro na frequência do código; 10: Sinal BPSK transmitido; e 11: Erro na fase do código.

B. Receptor CDMA

A Figura 14 mostra o sinal armazenado em arquivo binário e processado pelo receptor.

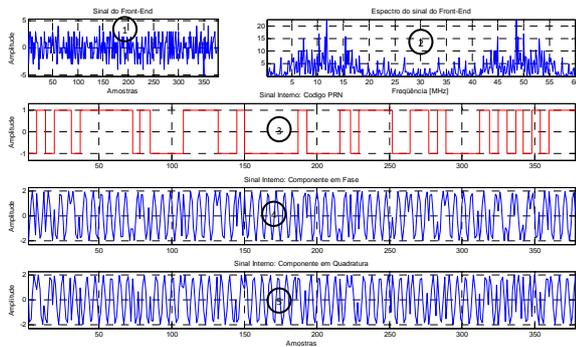


Fig. 14. Sinais da etapa de rastreamento: 1: sinal recebido; 2: Espectro do sinal recebido; 3 Código PRN gerado internamente; 4 Código PRN e portadora em fase; 5 Código PRN e portadora em quadratura.

O sinal da emissora deve ser fraco o suficiente para não prejudicar outros sistemas de comunicação. Nesta proposta, ele é transmitido com potência próxima a do ruído térmico.

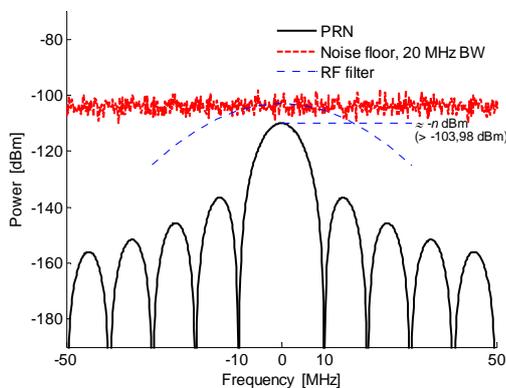


Fig. 15. Ruído térmico e densidade espectral de potência para o sinal recebido.

Dessa forma a estação reduz sua interferência sobre os outros sistemas de comunicação.

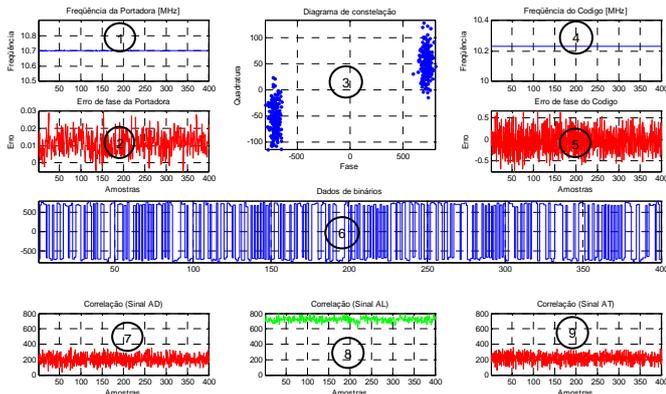


Fig. 16. Receptor de rádio difusão comunitária CDMA. Interface de acompanhamento. Rastreamento e demodulação do sinal.

Para a tela do receptor podemos listar as seguintes janelas 1: Doppler sobre a portadora; 2: Erro na fase da portadora; 3: Diagrama de Constelação; 4: Erro na frequência do código; 5: Erro de fase do código; 6: Sequência de bits recuperada; 7: Amplitude de correlação do sinal adiantado; 8: Amplitude de correlação do sinal alinhado; e 9: Amplitude de correlação do sinal atrasado.

V. CONCLUSÕES

É proposto um sistema de rádio difusão digital capaz de operar na mesma faixa de frequências alocadas para as rádios AM e FM e com menor potência para transmissão. Ela propõe um sistema capaz de transmitir a informação com potência abaixo do ruído térmico, ou próximo dependendo do alcance desejado.

Uma boa parcela dos sistemas comunicação de hoje utilizam transmissores de alta potência para garantir a qualidade do serviço. Através do uso de códigos PRN é possível alocar novos canais nas mesmas faixas de frequências já utilizadas e com transmissão de sinais com baixa potência, de modo a não prejudicar outros sistemas já existentes (de maneira semelhante ao GPS). O emprego de códigos PRN expande a aplicação do receptor ao permitir que este possa determinar a sua posição, desde que rastreie os sinais de pelo menos três transmissoras. É necessário, neste caso, que os transmissores estejam com suas bases de tempo sincronizadas.

O serviço de posicionamento pode auxiliar os atuais sistemas de navegação por satélite, trazendo benefícios reais para agricultura, para a administração e serviços públicos. Na aviação é capaz de auxiliar o pouso de aeronaves (exemplo: categoria III) e também servir como um canal de correção DGPS [5] para os sistemas GNSS. Do conceito de rádio comunitária, este protótipo do código fonte pode ser facilmente adaptado para as necessidades locais e para o processamento em tempo real através processadores de sinais digitais de alto desempenho como DSP e FPGAs e ser disponibilizado para uso comercial, assim como para uso das polícias federais.

Por apresentar baixo consumo de potência e um número de canais alternativos, na área de segurança, pode ser usada para rádios portáteis como os walk-talks para os serviços de segurança pública: Corpo de Bombeiros; Defesa Civil; Polícia; e também as Forças Armadas. Neste último caso o sinal pode ser facilmente criptografado e modificado periodicamente e com grande rapidez.

Não menos importante o fato de que daria um impulso na indústria Nacional com a produção dos transmissores/receptores.

AGRADECIMENTOS

A Empresa NavCon Navegação e Controle por possibilitar a formação contínua de seu seu corpo de engenheiros sendo uma empresa parceira do Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

REFERÊNCIAS

[1] J. B. Y. Tsui, *Fundamentals of Global Positioning System Receivers, A software approach*. Wiley Interscience Publication, 2000.
 [2] Carvalho, F. A. Alexandre B. V. Oliveira e F. Walter: "Receptor GPS em Software. In: 25ºSimpósio Brasileiro de Telecomunicações – XXV SBrT 2007, Recife, PE, Brasil, set, 03 a 07
 [3] Carvalho, F. A. e F. Walter, "Receptor GPS por Software em Tempo Real. Parte I: Geração dos Sinais", Anais do 120 Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA / 2006, São José dos Campos, SP, Brasil, out., 16 a 19.
 [4] Carvalho, F. A. e F. Walter, "Receptor GPS por Software em Tempo Real. Parte II: Correlator", Anais do 120 Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA / 2006, São José dos Campos, SP, Brasil, out., 16 a 19.
 [5] Parkinson, Bradford W.; Spilker Jr. James J., *Global Positioning System: Theory and Applications*- vol 1. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Hopfield model.