

7 Conclusões

O canal rádio-móvel é o principal elemento num sistema de comunicação móvel e, também, o responsável pelos problemas e limitações na comunicação. Assim, para se desenvolver, planejar e projetar um sistema, hoje na 3ª geração de móveis, é primordial que se tenha informação precisa das características dos canais rádio-móveis como perda no percurso, espalhamento de retardo, banda de coerência, espalhamento Doppler, tempo de coerência, etc...

Dentre os diversos tipos de cenários a vegetação tem sido pouco estudada devido aos muitos efeitos que a mesma produz num sinal que nela se propaga: atenuação, absorção, espalhamento e despolarização, o que torna difícil a sua caracterização. O presente trabalho foi desenvolvido tendo por objetivo do mesmo determinar os parâmetros de dispersão do canal rádio-móvel vegetado, a fim de se observar a influência da vegetação tanto na dispersão temporal do sinal, através do espalhamento de retardos e banda de coerência, como na dispersão em frequência do sinal, através do espalhamento Doppler e tempo de coerência. O espalhamento de retardo pode ser visto como um processo de filtragem na frequência, de largura igual à banda de coerência, enquanto o espalhamento na frequência é visto como um processo de filtragem no tempo, cuja largura é igual ao tempo de coerência.

Para se atingir o objetivo, era necessário que se implementasse uma sonda faixa-larga, que fosse capaz de fornecer não apenas as amplitudes dos perfis de potência de retardos, recebidos ao longo das rotas escolhidas, a fim de se determinar os espalhamentos de retardo. Também era preciso que as fases dos perfis recebidos pudessem ser detetadas, a fim de que os espalhamentos Doppler dos sinais pudessem ser determinados corretamente por transformada direta de Fourier dos perfis no domínio do tempo. Assim sendo, desenvolveu-se e implementou-se um sistema transmissor-receptor, cuja sonda receptora era do tipo STDCC. Na transmissão era entregue, à entrada do amplificador de potência, um sinal de referência do tipo seqüência pseudo-aleatória, mas filtrada, num nível de 0 dBm. No receptor era gerada a mesma seqüência filtrada do transmissor, mas com uma pequena diferença na frequência, permitindo que uma varredura de correlação fosse realizada, após passar o produto das duas seqüências por um

circuito integrador.

O sistema, então desenvolvido, cumpriu a sua finalidade e, após diversos testes e ajustes, observou-se que era preciso um aprimoramento em algumas partes do mesmo, sendo que o mais importante está relacionado aos padrões de frequência de rubídio, empregados tanto no transmissor quanto no receptor. Sendo estes a referência para todo o sistema, é primordial que ambos sejam os mais idênticos possível. Como visto, são usados como referência externa para os geradores de RF, de forma a deixá-los bem estáveis, servem de referência para garantir a estabilidade do relógio da parte digital do sistema e, principalmente, são empregados num sistema que opera com detecção síncrona. Neste caso, qualquer variação Δw na frequência das portadoras geradas vai implicar num perfil detetado cuja amplitude modulará um sinal triangular do tipo $[\cos(\Delta wt) - \sin(\Delta wt)]$, cuja frequência é igual à diferença de frequências Δw entre tais portadoras, no caso do erro em frequência [46]. Se esta diferença for muito pequena, o período desta onda triangular será muito grande e poderá ser desprezada a variação na amplitude do perfil devido tal envoltória. Na pior das hipóteses essa diferença deverá ter um período igual a 51,1 ms, tempo de duração de 1000 perfis, de forma a afetar igualmente os perfis, não interferindo nos resultados. Para tal, este valor seria igual a 19,56 Hz ($= 1/(51,1 \text{ ms})$).

Uma vez que os padrões de frequência de rubídio eram de fabricantes diferentes, sendo um deles de menor estabilidade, não foi possível a estabilidade ideal do sistema, uma vez que a menor diferença que se conseguiu com a sintonia dos padrões de frequência, referenciando os geradores, foi igual a 5,2 Hz. Supondo que esta seja a diferença entre as portadoras geradas, observa-se que 192 ms seria o período de repetição da envoltória triangular. Dessa forma, como a aquisição é realizada continuamente, observa-se que os perfis seriam afetados de forma diferenciada. Para diminuir tal diferença de frequência e obter perfis mais precisos, era necessário buscar o sincronismo dos geradores na recepção durante as medições, já que o gerador de 1830 MHz, empregado na recepção, era o menos estável.

Da mesma forma, se houver um erro de fase, o sinal detetado variará com o cosseno da diferença de fase das mesmas. Quanto à diferença de fase, juntamente com o circuito integrador montado, levaram a uma diminuição da

resolução da sonda, esperada para 100 ns. Foram testadas inúmeras variações dos componentes do circuito integrador de forma a se variar a sua constante de tempo e diminuir o tempo de resposta do mesmo, porém o que melhor se atingiu foi o valor de 200 ns para a resolução da mesma, já que o erro de fase foi mantido. O ideal é que os padrões de frequência de rubídio sejam comprados juntos, do mesmo fabricante.

Um outro fator relevante é a faixa dinâmica da sonda, já que existe um ruído de correlação inerente à mesma, somado ao ruído gerado no sistema. Buscou-se apurar a relação sinal-ruído, atingindo-se uma relação aproximada de 22 dB. Uma observação feita, após a montagem do circuito, é que um filtro passa-baixa deveria ter sido empregado no receptor após a mixagem do sinal, aí gerado com a FI de 50 MHz. Isto contribuiu para o aumento do ruído no receptor, visto que os harmônicos eram fortes e interferiam no sinal. Conseguiu-se melhorar a relação sinal-ruído empregando-se o filtro passa-baixa às saídas dos integradores.

Realizados os testes internos e com a sonda pronta para operar, partiu-se para as medições em campo. Medidas foram realizadas no interior da PUC/RJ e no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, na velocidade de 5 km/h. Nas primeiras a unidade receptora também realizou medições na velocidade de 15 km/h, enquanto no JB/ RJ apenas duas rotas tiveram seus perfis medidos nesta velocidade.

Inicialmente partiu-se para a análise em pequena escala, onde os parâmetros do canal foram determinados. Como algumas rotas eram grandes, elas foram divididas em sub-rotas, onde podia se afirmar que os perfis praticamente formavam um processo estacionário no sentido amplo, após investigação dos mesmos. Assim, era possível determinar os parâmetros com suas médias, medianas e desvios, por trechos das rotas.

Uma primeira observação é que a vegetação atenuou o sinal transmitido, além da atenuação normal num meio em visada, e que não foi possível analisar os parâmetros das rotas com vegetação mais densa entre transmissor e receptor, além de certa distância, cujo valor dependia do tipo de vegetação entre os mesmos, e variava entre 200 e 332 m. Nesse caso, o sinal recebido praticamente se igualava ao ruído gerado no canal, somado ao de correlação da sonda, e não era possível visualizar multipercursos, já que suas amplitudes confundiam-se com os picos de ruído.

Quanto aos parâmetros de dispersão no tempo obtidos na PUC/RJ, o espalhamento de retardo mostrou maiores valores nas rotas mistas, onde um misto de vegetação e construções contribuíam para o espalhamento de sinal. Seu valor variou de 92 a 136 nanossegundos nessas rotas, sendo o valor menor associado ao trecho em visada. Paralelamente, a banda de coerência em tais rotas mostrou-se da ordem de 490 KHz a 3,109 MHz. Quando em velocidade, tais rotas tiveram espalhamentos variando de 108 a 133 ns, com bandas de coerência na faixa de 407 a 664 KHz, indicando maior variação do retardo eficaz e da banda de coerência quando em velocidade mais baixa. Fica difícil mostrar uma tendência desses valores na PUC/RJ, visto que somente duas rotas tiveram seus parâmetros calculados. Das outras três rotas medidas, a PUC4 teve interferência nos pulsos de roda obtidos, não sendo possível tratar adequadamente as amostras. As rotas PUC2 e PUC3 apresentaram multipercursos de amplitudes elevadas, em certo intervalo de tempo, em quase todos os retardos, o que é praticamente impossível, e foram descartadas. Assim, as rotas de interesse na PUC foram classificadas em mistas, no grupo 2, e em velocidade, no grupo 4.

No JB/RJ, as rotas foram divididas em três grupos: o grupo 1, que é formado pelas rotas radiais, em visada à antena transmissora, com vegetação nas laterais; o grupo 3, que é constituído pelas rotas obstruídas pela vegetação e que são trans-versais ao raio direto de propagação e, na maioria das vezes, sendo atravessadas por rotas radiais; e o grupo 4, constituído de rotas em velocidade, ou seja, com deslocamento da unidade receptora em 15 km/h. As rotas do grupo 1 apresentaram espalhamento de retardo variando de 95 a 152 nanossegundos, com bandas de coerência na faixa 474 a 707 KHz. Já no grupo 3 os valores, em geral, eram maiores que os do grupo 1, indicando crescimento de retardo eficaz nas rotas obstruídas pela vegetação e com parâmetros na faixa de 160 ns a 2,9 s para o retardo eficaz e 184 KHz a 596 KHz para a banda de coerência. Ressalta-se que foram encontrados valores muito baixos de retardos eficazes como 24 ns, conseqüentemente bandas de coerência muito altas, da ordem de 3,13 MHz em trechos da rota JB10 do Jardim Botânico/RJ. Embora a vegetação existente entre esta rota e o transmissor pareça ser a mais densa do JB/RJ, ao se observar o gráfico de todos os perfis ao longo da mesma verifica-se que existem dois trechos nos quais há uma falha na vegetação e o sinal chega forte na rota. Uma vez que a mesma não seja muito extensa e suas extremidades cruzem com as rotas JB8 e

JB9, que têm visada direta ao transmissor, a rota JB10 apresenta amplitudes nos extremos não muito baixas devido à presença de campos difratados e/ou espalhados nos cruzamentos, que chegam ao receptor juntamente com o campo direto, obstruído pela vegetação. Dessa forma, embora classificada como rota obstruída, tal rota teria outra classificação e, como foi a única na PUC/RJ, não haveria possibilidade de se chegar a uma conclusão para os parâmetros em tal tipo de rota. Assim, embora os valores encontrados tenham sido mostrados, esta rota não será levada em conta.

Nas rotas do Jardim Botânico em velocidade maior, valores de retardos se situaram na faixa de 94 a 164 ns com bandas de coerência na faixa de 403 a 861 KHz. Ocorre, porém, que apenas as rotas em visada JB1 e JB4 tiveram as medidas aquisitadas na velocidade de 15 km/h. Para uma análise efetiva, todas as rotas precisariam também ter sido percorridas com essa velocidade a fim de que se pudesse determinar como a mesma influiria nos parâmetros das rotas em vegetação. Assim, apenas é possível assinalar que na rota JB1, em visada, o aumento da velocidade acarretou em aumento de retardo eficaz, o que também ocorreu no trecho em visada da rota PUC6. Fato inverso ocorreu na rota JB4.

Comparando-se os resultados encontrados nos diversos grupos observa-se, na Tabela 6 a seguir que, na vegetação, foram obtidos valores de retardos eficazes não só maiores, como dentro de uma faixa maior de valores, enquanto a banda de coerência assumiu valores mais baixos, em geral. Com isso, observa-se claramente que não existe uma relação constante entre os dois parâmetros, apenas confirmando-se a relação inversa entre os mesmos, como se pode observar nas curvas traçadas de $B_C \times \sigma_T$, no Capítulo 6, onde também se verificou a validade do limiar de Fleury, que é uma curva limite inferior para os pontos obtidos de banda de coerência versus retardo eficaz. Calculando-se a relação σ_T / B_C nas rotas em vegetação, houve uma tendência desta relação ser maior nas rotas mais distantes, mas somente é possível concluir sobre a mesma se uma campanha de medidas for realizada e se a vegetação for completamente caracterizada. Ressalta-se que no grupo 3 não foram incluídos os valores da rota JB10, pelo motivo já exposto anteriormente, uma vez que a mesma não se classificaria nesses grupos.

Indo às Tabelas 1 e 2, no Capítulo 6, verifica-se a variação direta do retardo médio relativo com o espalhamento de retardos ao longo de uma rota, o que significa que uma resposta do canal que apresente forte espalhamento será

mais lenta, uma vez que o mesmo sinal chega com multipercursos fortes em maiores retardos. Isso vem comprovar a boa operação do sistema desenvolvido para a sondagem do canal.

Grupo	Retardo Eficaz σ_T	Banda de Coerência B_C (KHz)	Tipo de Rota	Local
2	92 – 136 ns	490 – 3109	Mista	PUC/ RJ
4	108 – 133 ns	407 – 664	Velocidade	PUC/ RJ
1	95 – 152 ns	474 – 707	Radial/ LOS	JB/ RJ
3	160 ns – 2,9 s	184 – 596	Transversal/ Vegetação	JB/ RJ
4	94 – 164 ns	403 – 861	Velocidade	JB/ RJ

Tabela 6 – Variação dos Parâmetros de Dispersão no Tempo, nos Grupos de Rotas

Os resultados aqui obtidos para os parâmetros de dispersão no tempo, no grupo 3 em vegetação, puderam ser comparados com aqueles encontrados por Seker [47] em ambiente de floresta. Realizando medições em distâncias até 300 m, ele concluiu que, para alturas de antenas menores que 14,6 m, onde predominava a transmissão de sinal através dos caules e não das copas das árvores, o retardo eficaz crescia com a distância ao transmissor, porém, a partir de 200 m e até o limite de suas medições em 300 m, havia um decréscimo do mesmo. Isto foi confirmado nos resultados encontrados no JB/RJ, nas rotas 5 e 6, onde a altura da antena transmissora empregada foi igual a 5,80 m.

Fechando a análise de dispersão no tempo, analisou-se o comportamento dos parâmetros ao se passar de uma rota vegetada para outra em visada e concluiu-se pelo crescimento da relação entre os retardos eficazes da rota obstruída e a rota em visada, indicando que a variação do retardo eficaz numa rota vegetada para uma em visada que a atravesse, é tanto maior quanto maior for a distância ao transmissor. Também se verificou que o retardo eficaz na vegetação cresce com a distância, como ocorre na maioria dos meios.

Uma vez que a sonda foi projetada para medir a fase do sinal chegando à unidade receptora, os perfis de espalhamento Doppler nas rotas puderam ser calculados, em cada retardo, e alguns foram plotados. Cada perfil representa o espalhamento espectral sofrido pelo sinal móvel que deixa o transmissor num

certo instante e que chega no receptor por diversos multipercursos, num mesmo retardo. Não tendo achado referências para tais parâmetros em meios vegetados, uma comparação não pode ser feita, porém observando-se os perfis obtidos por Xiongwen [47] em ambientes *indoor* e *outdoor*, constatou-se a semelhança dos perfis nas rotas obstruídas pela vegetação com aqueles geralmente obtidos em ambientes *indoor*, sem visada. Ambos os ambientes apresentam grande abertura angular de espalhamento já que os perfis apresentam amplitudes fortes em diversos valores de frequência Doppler, correspondendo a diversos ângulos de chegada dos multipercursos. Para ambientes *outdoor*, com ou sem visada, o autor obteve diferentes perfis de espalhamento Doppler, dependendo da urbanização do ambiente e da altura da antena transmissora: abaixo, acima ou ao nível dos telhados das construções. Um perfil muito encontrado nas rotas em visada dos ambientes da PUC/RJ e JB/RJ, foi o perfil em forma de “U”, que representa um sinal com espalhamento essencialmente no plano azimutal. Uma vez que a altura da transmissora era igual a 5,8 m e a da receptora, na unidade móvel, era 2,30 m, quando esta se achava próxima à transmissora o espectro mostrava-se com fortes amplitudes em deslocamentos Doppler menores, indicando ângulos de chegada mais próximos de 90°, como no início da rota JB1 e PUC1, por exemplo.

Dando continuidade, partiu-se para a determinação dos parâmetros de dispersão na frequência. Os valores encontrados para as diversas rotas mostraram os deslocamentos médios maiores que os eficazes associados, resultado semelhante ao obtido por Howard [50], em ambiente indoor. Os valores de tempo de coerência mostraram variação inversa com o Doppler eficaz, assim como a banda de coerência com o retardo eficaz também o fizeram. Tal variação, porém, não se mostra constante, não sendo possível definir uma expressão que relacione ambos.

A Tabela 7 mostra a faixa de variação dos parâmetros nos diversos grupos de rotas e conclui-se que os maiores valores de Doppler eficazes estão associados às rotas em velocidade, embora a sonda não seja ideal para medir em velocidades maiores que 5,7 km/h.

Grupo	Doppler Médio f_D (Hz)	Doppler Eficaz σ_D (Hz)	Tempo de Coerência (ms)	Situação	Local
2	5,2 – 8,9	4 – 5,5	8 – 31	Mista	PUC/ RJ
4	9,2 – 10,6	4,8 – 6,2	10 - 17	Velocidade	PUC/ RJ
1	1,8 – 7,1	0,9 – 5,5	11 – 74	Radial/ LOS	JB/ RJ
3	1,8 – 2,7	1,1 – 2,7	12 – 74	Transversal/ Vegetada	JB/ RJ
4	6,5 – 9,4	2,6 – 5,9	12 – 22	Velocidade	JB/ RJ

Tabela 7 – Variação dos Parâmetros de Dispersão na Frequência, nos Grupos de Rotas

Ressalta-se que nesta tabela não foi incluída a rota JB2, já que a mesma apresentou valores discrepantes, pois como só foram tomados os 70 perfis iniciais, quando foi realizada a transformada no tempo, os perfis restantes, mais baixos, não foram considerados, o que acarreta em erro na sua resposta. Também aqui não foram mostrados os valores obtidos para a rota 10, por razões já explicadas anteriormente.

É sabido que cada transformação discreta de Fourier que é realizada nos perfis, vai acarretar num erro devido à fuga espectral ocorrida. Para incorrer num erro menor uma filtragem é pré-aplicada, com as chamadas “janelas de Kaiser”, cada vez que uma transformação de Fourier precisa ser realizada. Como duas filtrações e duas transformadas de Fourier foram realizadas nos perfis medidos, para a obtenção dos parâmetros de dispersão na frequência, os resultados obtidos para os mesmos são aproximados, e somente uma sonda que pudesse medir diretamente os perfis de Doppler P_H é que daria os resultados mais precisos. Também o cálculo de tempo de coerência é aproximado, visto que mais uma filtragem e uma transformada inversa têm que ser realizadas nos perfis de Doppler. Isto, contudo, não invalida os cálculos e os mesmos servem de base para o projeto de sistemas. Ressalta-se, porém, que é preciso usar outras técnicas de limpeza de ruído dos perfis ou mesmo aprimorar a técnica usada, para atestar a validade dessas medidas obtidas.

Embora os resultados aqui mostrados confirmem alguns pontos, muitos outros não puderam ser confirmados, pois não há bibliografia relacionada. Assim, é preciso que novas medições sejam realizadas, através de uma extensa campanha de medidas, de forma a confirmar os resultados encontrados.

Assim, como sugestões para trabalhos futuros, podem ser citadas:

- Realização de uma campanha de medidas nas mesmas rotas, inclusive com velocidade, para que se possa fazer uma análise estatística apurada;
- Realização de medições em diferentes tipos de ambientes vegetados para conclusões mais gerais dos parâmetros de dispersão nos mesmos;
- Realização de medições em outras estações do ano, pois a densidade de vegetação varia de uma estação à outra. Assim, será possível se observar a variação dos parâmetros do canal com as mesmas. O mesmo deve ser feito com vegetação molhada e seca, para comparação de resultados;
- Emprego, também, da polarização horizontal nos testes para se comparar o efeito da arborização em ambas as polarizações;
- Estudo de novas técnicas de limpeza de ruído para aplicação nos perfis de potências de retardos e comparação com as técnicas empregadas. Verificar a possibilidade de se usar a técnica CLEAN juntamente com os pulsos de *trigger* de forma a estendê-la a rotas sem visada;
- Operação da sonda de forma a medir maiores deslocamentos Doppler, através do decréscimo do número de bits da sequência PN, bastando alterar o software que gera as suas amostras. Em paralelo, é preciso encontrar no mercado memórias mais rápidas e DACs compatíveis, que também devem operar com um maior número de bits, garantindo uma melhor recuperação do sinal ;
- Realização de medidas com antenas diretivas para verificar a variação dos parâmetros obtidos nesses sistemas;
- Estudo de melhorias na sonda para aumentar o seu alcance;
- Estudo da variação dos parâmetros com a frequência e a altura da antena;
- Desenvolvimento da expressão do limiar, semelhante ao realizado por Fleury, que defina a faixa de variação do tempo de coerência com o Doppler eficaz.