

Projeto 1 - Simulação do Canal

Pedro Henrique Dornelas Almeida

Comunicações Móveis



6 de outubro de 2025

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Definições de Variáveis

- Linguagem utilizada: Matlab;
- Cenário utilizado: UMa-NLoS.

```
5 %% Simulation Params
6
7 % Enviroment - UMa-NLoS - number 4 sorted
8 env = 'UMa_NLoS';
9 % Frequency (GHz)
10 freq_ghz = 3;
11 c = 299792458; % m/s
12 lambda = c / (freq_ghz * 1e9);
13 % Multipath components
14 N = 100;
15 % Elevation Angle
16 phi_bar = pi/4;
17 % RX Velocity
18 v = 5; % m/s
```

Figura: Variáveis Globais

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso**
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Espalhamento de Atraso

```
21 %% Delay Spread RMS
22 % Stats
23 [delay_mean, delay_std] = get_delay_stats(freq_ghz, env);
24 % Gaussian - only one sample to represent
25 delay_spread_rms_log = normrnd(delay_mean, delay_std, [1,1]);
26 delay_spread = 10^(delay_spread_rms_log);
27 delay_spread_ns = 1e9*delay_spread
28
29 %% Generate Delay Samples
30 % Proportionality Factor
31 r_tau = get_prop_factor_delay(env);
32 mu_tau = delay_spread * r_tau;
33 % Delay samples
34 tau_n_absolute = exprnd(mu_tau, [N,1]);
35 tau_n_normalized = tau_n_absolute - min(tau_n_absolute);
36 tau_n = sort(tau_n_normalized);
37 % tau n ns = tau n(i:5)*1e9
```

Figura: Espalhamento de Atraso e Amostras de Atraso

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência**
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Potência Multipercurso - Código

```
39 % Generate Power Samples
40 % Power stats
41 [shadow_std, rice_mean, rice_std] = get_power_stats(env);
42 % Shadowing samples
43 shadow_samples = normrnd(0, shadow_std, [N,1]);
44 % Power samples
45 alpha_n_2 = exp(-tau_n .* (r_tau-1) ./ (r_tau*delay_spread)) .* 10.^(-shadow_samples ./ 10);
46 % alpha_n_2(1:5)
47
48 %% Rice factor
49 kr = 0;
50 kr_db = -inf;
51 if env == "UMi_LoS" || env == "UMa_LoS"
52     kr_db = normrnd(rice_mean, rice_std, [1,1]);
53     kr = 10 ^ (kr_db / 10);
54 end
55 kr
56
57 % Normalizing power
58 hat_omega_c = sum(alpha_n_2(2:N));
59 alpha_n_2 = (1/(kr + 1)) .* (alpha_n_2 ./ hat_omega_c);
60 alpha_n_2(1) = kr / (kr + 1);
61
62 % Verifying power = 1
63 omega_c = sum(alpha_n_2)
64 % Verifying Rice Factor
65 kr_check = alpha_n_2(1) ./ sum(alpha_n_2(2:N))
66 % Verifying Delay Spread
67 tau_bar = (1 / omega_c) * sum(tau_n .* alpha_n_2);
68 delay_spread
69 sigma_tau_check = sqrt((1 / omega_c) * sum(alpha_n_2 .* ((tau_n - tau_bar) .^ 2)))
```

Figura: Variáveis para Potência Multipercurso

Fator de Rice

```
Command Window

kr =

    0

omega_c =

    1.0000

kr_check =

    0
```

Figura: UMa-NLoS

```
Command Window

kr =

    26.8829

omega_c =

    1

kr_check =

    26.8829
```

Figura: UMa-LoS

Curva do Perfil de Atraso de Potência

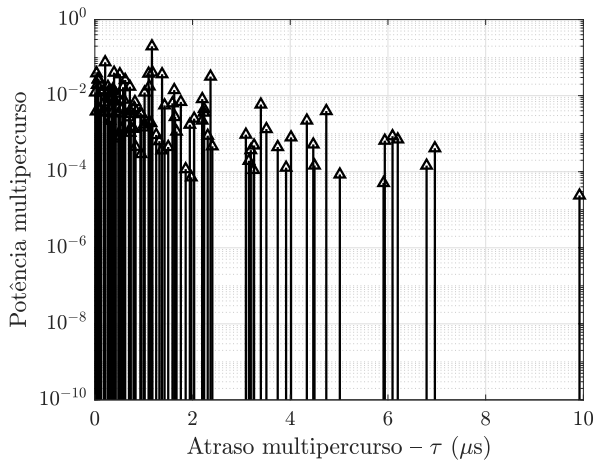


Figura: Perfil de Atraso de Potência

Curva do Perfil de Atraso de Potência

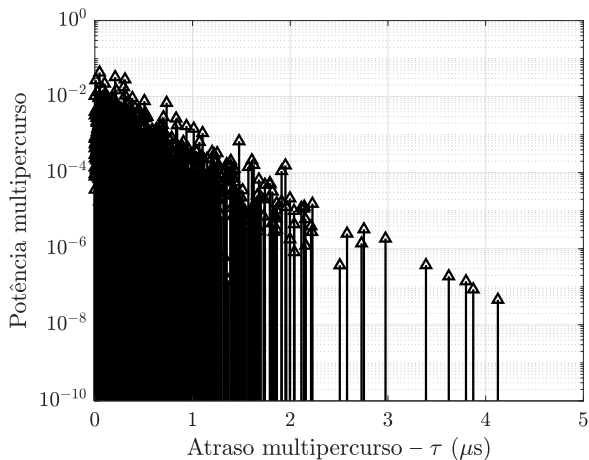


Figura: Perfil de Atraso de Potência - 1000 componentes

Espalhamento de Atraso Gerado e Medido

```
delay_spread =  
    8.8316e-07  
  
sigma_tau_check =  
    8.3889e-07
```

Figura: Espalhamento de Atraso Gerado e Medido

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada**
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Ângulos em Azimute - Geração

```
94 % -----
95 %% Angles Stats
96 % -----
97 [azimuth_mean, azimuth_std, elevation_mean, elevation_std] = get_angle_stats(freq_ghz, env);
98 % Azimuth Angles
99 sigma_theta_degree = 10 ^ (normrnd(azimuth_mean, azimuth_std, [1,1]));
100 sigma_theta_rad = sigma_theta_degree * (pi / 180);
101 max_alpha = max(alpha_n_2);
102 theta_n = 1.42 * sigma_theta_rad * sqrt(-log(alpha_n_2 ./ max_alpha));
103 % Adjusts
104 un = randsample([-1,1], N, true)';
105 % un(1:5)
106 yn = normrnd(0, sigma_theta_rad/7, [N, 1]);
107 % yn(1:5)
108 % Finally
109 theta_n = (un .* theta_n) + yn;
110 if env == "UMi_LoS" || env == "UMa_LoS"
111     theta_n = theta_n - theta_n(1);
112     You, 2 hours ago | 1 author (You)
113 else
114     theta_n(1) = 0;
115 end
```

Figura: Ângulos Azimutais

Ângulos em Azimute

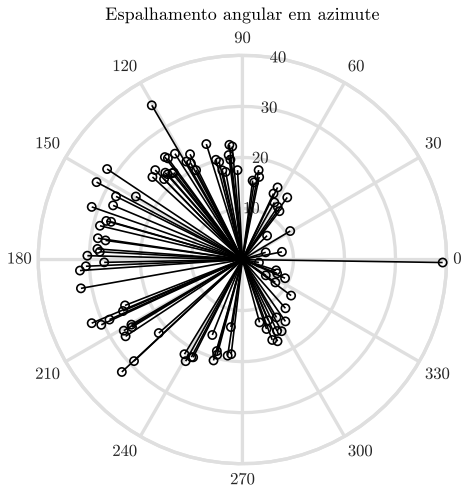


Figura: Ângulos Azimutais

Ângulos em Azimute

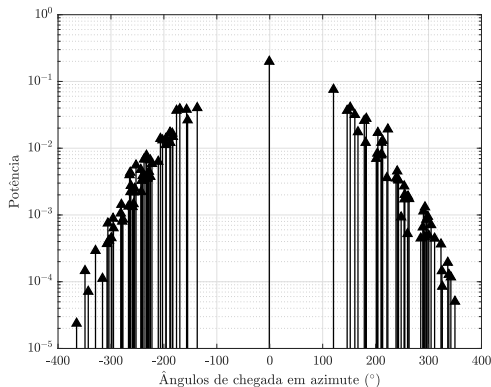


Figura: Espalhamento de Potência com Ângulos Azimutais

Ângulos em Elevação - Geração

```
161 %% Elevation Angles
162 sigma_phi_degree = 10 ^ (normrnd(elevation_mean, elevation_std, [1,1]));
163 sigma_phi_rad = sigma_phi_degree * (pi / 180);
164 max_alpha = max(alpha_n_2);
165 phi_n = -sigma_phi_rad * log(alpha_n_2 ./ max_alpha);
166 % Adjusts
167 un = randsample([-1,1], N, true)';
168 % un(1:5)
169 yn = normrnd(0, sigma_phi_rad/7, [N, 1]);
170 % yn(1:5)
171 % Finally
172 phi_n = (un .* phi_n) + yn;
173 if env == "UMi_LoS" || env == "UMa_LoS"
174     phi_n = phi_n - phi_n(1) + phi_bar;
175     You, 2 hours ago | 1 author (You)
176 else
177     phi_n(1) = 0;
178 end
```

Figura: Ângulos em Elevação

Ângulos em Elevação

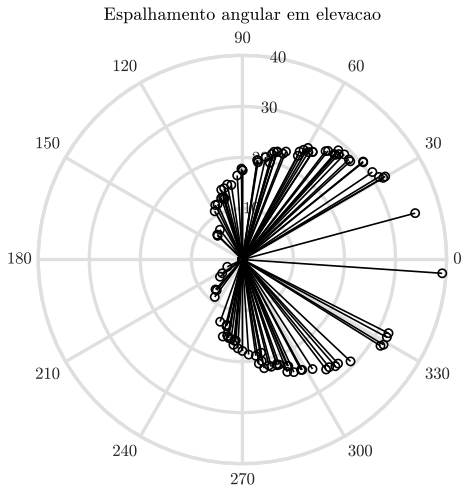


Figura: Ângulos em Elevação

Ângulos em Elevação

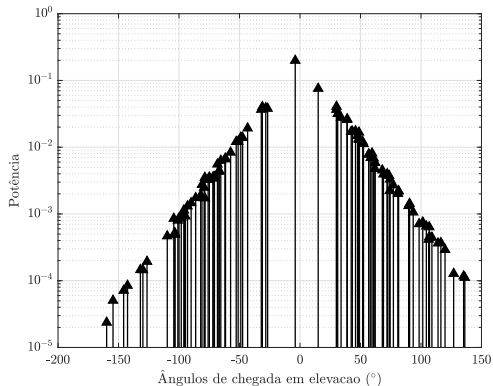


Figura: Espalhamento de Potência com Ângulos em Elevação

Vetores de Direção de Chegada

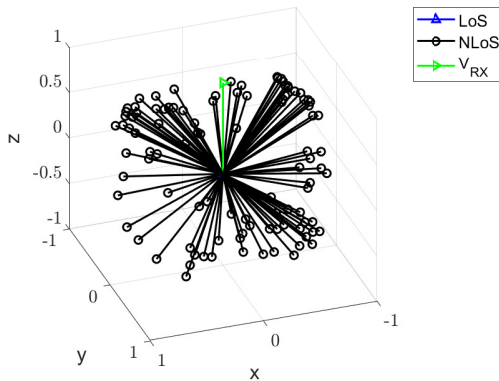


Figura: Vetores de Direção de Chegada

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler**
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Desvios Doppler - Geração

```
259 % -----  
260 ∨ %% Doppler Effects  
261 % -----  
262 vn = (v / lambda) * (rn * vrx');  
263 vn = sum(vn, 2);
```

Figura: Desvio Doppler

Desvios Doppler - $v = 5\text{ m/s}$

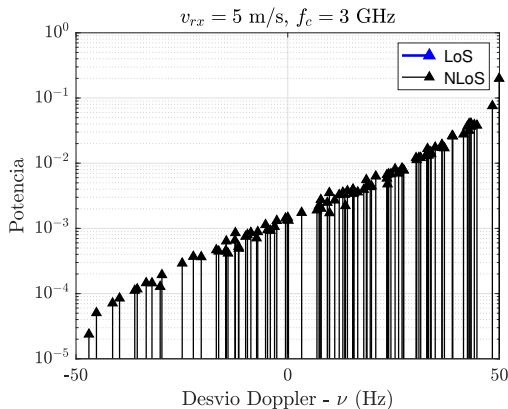


Figura: Espalhamento de Potência - Desvios Doppler $v = 5\text{ m/s}$

Desvios Doppler - $v = 50\text{m/s}$

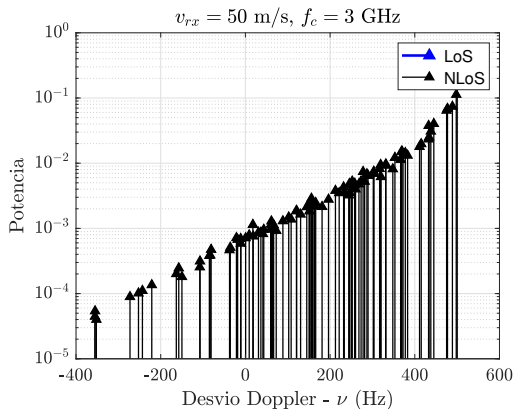


Figura: Espalhamento de Potência - Desvios Doppler $v = 50\text{m/s}$

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal**
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Sinal Transmitido - Geração

Sinais a serem transmitidos:

```
283 % -----  
284 %% Signal Analysis  
285 % -----  
286 deltas_t = [1e-7, 1e-5, 1e-3];  
287 n_samples = 1e5;  
288  
289 % Transmitted Signal  
290 t = zeros(n_samples, length(deltas_t));  
291 signal_tx = zeros(n_samples, length(deltas_t));  
292 for d = 1 : length(deltas_t)  
293     t(:, d) = linspace(0, 5*deltas_t(d), n_samples);  
294     [signal_tx(:, d)] = generate_pulse(0, t(:, d), deltas_t(d));  
295 end
```

Figura: Geração dos Sinais Transmitidos

Função auxiliar para gerar o pulso:

```
506 function [signal] = generate_pulse(delay, t, pulse_width)  
507     signal = zeros(length(t), 1);  
508     for i = 1 : length(t)  
509         if t(i) >= delay && t(i) <= pulse_width + delay  
510             signal(i) = 1;  
511         end  
512     end  
513 end
```

Figura: Função Auxiliar para Geração dos Pulsos

Sinais Recebidos - Geração

```
217 %
218 % Received signal
219 %
220
221 signal_rx = zeros(n_samples, N, length/deltas, 1);
222 % delay spread (normalized, long enough delay)
223 %
224 %
225 %
226 %
227 %
228 %
229 %
230 %
231 %
232 %
233 %
234 %
235 %
236 %
237 %
238 %
239 %
240 %
241 %
242 %
243 %
244 %
245 %
246 %
247 %
248 %
249 %
250 %
251 %
252 %
253 %
254 %
255 %
256 %
257 %
258 %
259 %
260 %
261 %
262 %
263 %
264 %
265 %
266 %
267 %
268 %
269 %
270 %
271 %
272 %
273 %
274 %
275 %
276 %
277 %
278 %
279 %
280 %
281 %
282 %
283 %
284 %
285 %
286 %
287 %
288 %
289 %
290 %
291 %
292 %
293 %
294 %
295 %
296 %
297 %
298 %
299 %
300 %
301 %
302 %
303 %
304 %
305 %
306 %
307 %
308 %
309 %
310 %
311 %
312 %
313 %
314 %
315 %
316 %
317 %
318 %
319 %
320 %
321 %
322 %
323 %
324 %
325 %
326 %
327 %
328 %
329 %
330 %
331 %
332 %
333 %
334 %
335 %
336 %
337 %
338 %
339 %
340 %
341 %
342 %
343 %
344 %
345 %
346 %
347 %
348 %
349 %
350 %
351 %
352 %
353 %
354 %
355 %
356 %
357 %
358 %
359 %
360 %
361 %
362 %
363 %
364 %
365 %
366 %
367 %
368 %
369 %
370 %
371 %
372 %
373 %
374 %
375 %
376 %
377 %
378 %
379 %
380 %
381 %
382 %
383 %
384 %
385 %
386 %
387 %
388 %
389 %
390 %
391 %
392 %
393 %
394 %
395 %
396 %
397 %
398 %
399 %
400 %
401 %
402 %
403 %
404 %
405 %
406 %
407 %
408 %
409 %
410 %
411 %
412 %
413 %
414 %
415 %
416 %
417 %
418 %
419 %
420 %
421 %
422 %
423 %
424 %
425 %
426 %
427 %
428 %
429 %
430 %
431 %
432 %
433 %
434 %
435 %
436 %
437 %
438 %
439 %
440 %
441 %
442 %
443 %
444 %
445 %
446 %
447 %
448 %
449 %
450 %
451 %
452 %
453 %
454 %
455 %
456 %
457 %
458 %
459 %
460 %
461 %
462 %
463 %
464 %
465 %
466 %
467 %
468 %
469 %
470 %
471 %
472 %
473 %
474 %
475 %
476 %
477 %
478 %
479 %
480 %
481 %
482 %
483 %
484 %
485 %
486 %
487 %
488 %
489 %
490 %
491 %
492 %
493 %
494 %
495 %
496 %
497 %
498 %
499 %
500 %
501 %
502 %
503 %
504 %
505 %
506 %
507 %
508 %
509 %
510 %
511 %
512 %
513 %
514 %
515 %
516 %
517 %
518 %
519 %
520 %
521 %
522 %
523 %
524 %
525 %
526 %
527 %
528 %
529 %
530 %
531 %
532 %
533 %
534 %
535 %
536 %
537 %
538 %
539 %
540 %
541 %
542 %
543 %
544 %
545 %
546 %
547 %
548 %
549 %
550 %
551 %
552 %
553 %
554 %
555 %
556 %
557 %
558 %
559 %
560 %
561 %
562 %
563 %
564 %
565 %
566 %
567 %
568 %
569 %
570 %
571 %
572 %
573 %
574 %
575 %
576 %
577 %
578 %
579 %
580 %
581 %
582 %
583 %
584 %
585 %
586 %
587 %
588 %
589 %
590 %
591 %
592 %
593 %
594 %
595 %
596 %
597 %
598 %
599 %
600 %
601 %
602 %
603 %
604 %
605 %
606 %
607 %
608 %
609 %
610 %
611 %
612 %
613 %
614 %
615 %
616 %
617 %
618 %
619 %
620 %
621 %
622 %
623 %
624 %
625 %
626 %
627 %
628 %
629 %
630 %
631 %
632 %
633 %
634 %
635 %
636 %
637 %
638 %
639 %
640 %
641 %
642 %
643 %
644 %
645 %
646 %
647 %
648 %
649 %
650 %
651 %
652 %
653 %
654 %
655 %
656 %
657 %
658 %
659 %
660 %
661 %
662 %
663 %
664 %
665 %
666 %
667 %
668 %
669 %
670 %
671 %
672 %
673 %
674 %
675 %
676 %
677 %
678 %
679 %
680 %
681 %
682 %
683 %
684 %
685 %
686 %
687 %
688 %
689 %
690 %
691 %
692 %
693 %
694 %
695 %
696 %
697 %
698 %
699 %
700 %
701 %
702 %
703 %
704 %
705 %
706 %
707 %
708 %
709 %
710 %
711 %
712 %
713 %
714 %
715 %
716 %
717 %
718 %
719 %
720 %
721 %
722 %
723 %
724 %
725 %
726 %
727 %
728 %
729 %
730 %
731 %
732 %
733 %
734 %
735 %
736 %
737 %
738 %
739 %
740 %
741 %
742 %
743 %
744 %
745 %
746 %
747 %
748 %
749 %
750 %
751 %
752 %
753 %
754 %
755 %
756 %
757 %
758 %
759 %
760 %
761 %
762 %
763 %
764 %
765 %
766 %
767 %
768 %
769 %
770 %
771 %
772 %
773 %
774 %
775 %
776 %
777 %
778 %
779 %
780 %
781 %
782 %
783 %
784 %
785 %
786 %
787 %
788 %
789 %
790 %
791 %
792 %
793 %
794 %
795 %
796 %
797 %
798 %
799 %
800 %
801 %
802 %
803 %
804 %
805 %
806 %
807 %
808 %
809 %
810 %
811 %
812 %
813 %
814 %
815 %
816 %
817 %
818 %
819 %
820 %
821 %
822 %
823 %
824 %
825 %
826 %
827 %
828 %
829 %
830 %
831 %
832 %
833 %
834 %
835 %
836 %
837 %
838 %
839 %
840 %
841 %
842 %
843 %
844 %
845 %
846 %
847 %
848 %
849 %
850 %
851 %
852 %
853 %
854 %
855 %
856 %
857 %
858 %
859 %
860 %
861 %
862 %
863 %
864 %
865 %
866 %
867 %
868 %
869 %
870 %
871 %
872 %
873 %
874 %
875 %
876 %
877 %
878 %
879 %
880 %
881 %
882 %
883 %
884 %
885 %
886 %
887 %
888 %
889 %
890 %
891 %
892 %
893 %
894 %
895 %
896 %
897 %
898 %
899 %
900 %
901 %
902 %
903 %
904 %
905 %
906 %
907 %
908 %
909 %
910 %
911 %
912 %
913 %
914 %
915 %
916 %
917 %
918 %
919 %
920 %
921 %
922 %
923 %
924 %
925 %
926 %
927 %
928 %
929 %
930 %
931 %
932 %
933 %
934 %
935 %
936 %
937 %
938 %
939 %
940 %
941 %
942 %
943 %
944 %
945 %
946 %
947 %
948 %
949 %
950 %
951 %
952 %
953 %
954 %
955 %
956 %
957 %
958 %
959 %
960 %
961 %
962 %
963 %
964 %
965 %
966 %
967 %
968 %
969 %
970 %
971 %
972 %
973 %
974 %
975 %
976 %
977 %
978 %
979 %
980 %
981 %
982 %
983 %
984 %
985 %
986 %
987 %
988 %
989 %
990 %
991 %
992 %
993 %
994 %
995 %
996 %
997 %
998 %
999 %
1000 %
```

Figura: Cálculo dos Sinais Recebidos

Sinal Recebido - $\delta t = 10^{-7}s$

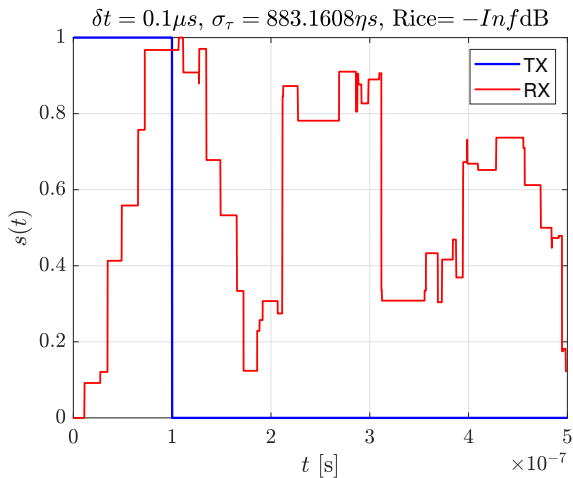


Figura: Sinal Recebido $\delta t = 10^{-7}s$

Sinal Recebido - $\delta t = 10^{-5}s$

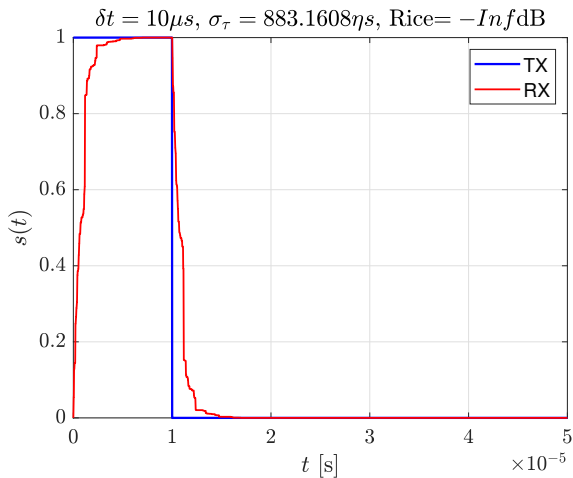


Figura: Sinal Recebido $\delta t = 10^{-5}s$

Sinal Recebido - $\delta t = 10^{-3}s$

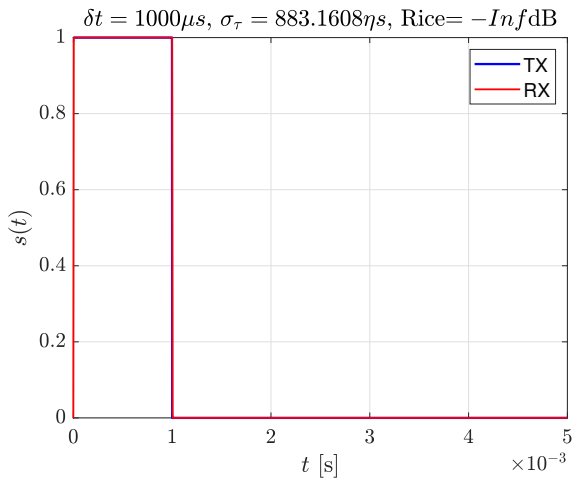


Figura: Sinal Recebido $\delta t = 10^{-3}s$

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Espalhamento de Atraso
- 3 Perfil de Atraso de Potência
- 4 Ângulos de Chegada
- 5 Efeito Doppler
- 6 Transmissão do Sinal
- 7 Banda e Tempo de Coerência

Autocorrelação - Geração

```
355 %% Coherency bandwidth and coherency time
356 n_samples = 1e4;
357 k = logspace(-3, 10, n_samples);
358 t = logspace(-6, 0, n_samples);
359
360 omega_c = sum(alpha_n_2);
361 autocorr_freq_n = (1 / omega_c) .* alpha_n_2 .* exp(-2i * pi * tau_n .* k);
362 autocorr_freq = sum(autocorr_freq_n, 1);
363
364 autocorr_time_n = (1 / omega_c) .* alpha_n_2 .* exp(2i * pi * vn .* t);
365 autocorr_time = sum(autocorr_time_n, 1);
```

Figura: Autocorrelação

Banda de Coerência

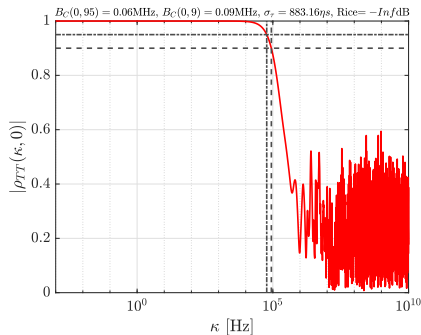


Figura: Banda de Coerência

Tempo de Coerência - $v = 5m/s$

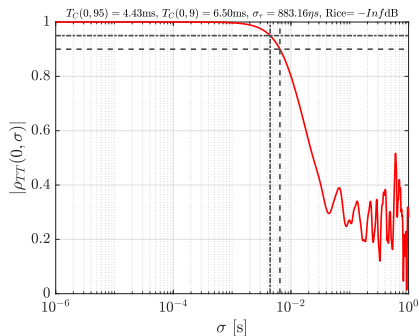


Figura: Tempo de Coerência $v = 5m/s$

Tempo de Coerência - $\nu = 50m/s$

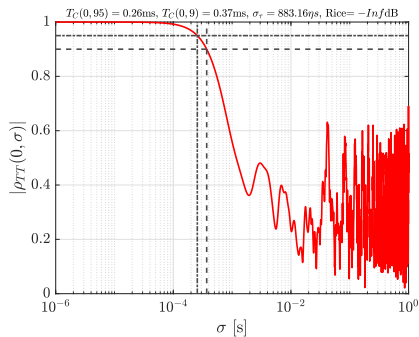


Figura: Tempo de Coerência $\nu = 50m/s$

Obrigado pela atenção!



Pedro Henrique Dornelas Almeida
242110048@aluno.unb.br