

УДК 621.396.677.51

## МОДЕЛЬ РАДИОЛИНИИ «ПЕРЕДАТЧИК – ПРИЕМНЫЙ КАНАЛ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПЕЛЕНГАТОРА С КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ» ДИАПАЗОНА ОВЧ

КРЕЙДИК Е. Л.

ООАО «АГАТ-СИСТЕМ»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: kreidik@rambler.ru

**Аннотация.** В работе предложена модель радиолинии «передатчик – приемный канал многоканального пеленгатора с кольцевой антенной решеткой» диапазона ОВЧ. По данной модели произведен расчет отношения мощности сигнала (передатчика) к мощности шума (для краткости, отношения сигнал/шум) в приемном канале указанного пеленгатора в зависимости от соответствующих параметров радиолинии.

**Abstract.** The model of the radio line "transmitter – receiving channel of a multi-channel direction finder with a ring antenna array" in the VHF range is proposed. This model is used to calculate the ratio of the signal power (transmitter) to the noise power (for short, the signal-to-noise ratio) in the receiving channel of the specified direction finder, depending on the corresponding parameters of the radio line.

### Введение

В современных средствах радиоразведки (РР), в том числе в составе станции ответных помех, широкое применение находят  $M$ -элементные кольцевые антенные решетки [1, 2]. Для инженерной практики на стадии проектирования аппаратуры РР, прежде всего, представляет интерес получение оценки отношения сигнал/шум  $\rho_i$  на выходе приемного канала радиопеленгатора. Далее приняты следующие допущения:

- наземный передатчик функционирует в диапазоне ОВЧ [1, 3, 4];
- в состав аппаратуры РР СОП входит  $M$ -элементная кольцевая антенная решетка;
- полоса пропускания канала измерения в аппаратуре РР согласована с полосой пропускания частотного канала СРС  $B$ .

Указанный передатчик, приемный канал многоканального радиопеленгатора и соответствующие антенны (в том числе кольцевая антенная решетка), электрические цепи и среда распространения составляют радиолинию «передатчик – приемный канал многоканального пеленгатора с кольцевой антенной решеткой» диапазона ОВЧ.

Существует ряд различных моделей для прогнозирования потерь при распространении радиоволн на частотах выше 30 МГц в зависимости от соответствующих параметров и характеристик конкретной местности [5, 6]. В настоящее время одной из известных является модель Эгли (Egli) [7]. Указанную модель можно использовать для прогнозирования дальности действия наземных СРС [8] и средств РР [3, 9]. Модель Эгли используется в полосе частот 30–1000 МГц для прогнозирования потерь при распространении радиоволн на трассах длиной 1–50 км [3] над земной неровной поверхностью с незначительными колебаниями высот в пределах 15 м [10]. Далее прогнозирование основных потерь передачи в радиолинии  $l_b$  выполнено по модели Эгли. Для этого использовано соотношение, предложенное в [11]:

$$P_{r,(50)} = \begin{cases} P_t G_t G_r \left( \frac{h_t (9,15 h_r)^{1/2}}{R^2} \right)^2 \left( \frac{40}{f_{(\text{MHz})}} \right)^2, & 9 > h_r > 2; \\ P_t G_t G_r \left( \frac{h_t h_r}{R^2} \right)^2 \left( \frac{40}{f_{(\text{MHz})}} \right)^2, & h_r \geq 9, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_{r,(50)}$  – мощность радиочастотного сигнала, отдаваемая приемной антенной в нагрузку (далее в (2) – мощность радиочастотного сигнала на входе приемного тракта), Вт;  $P_t$  – мощность радиочастотного

сигнала, подводимого к передающей антенне (далее в (2) – мощность радиочастотного сигнала на выходе передатчика), Вт;  $G_t, G_r$  – коэффициенты усиления соответственно передающей и приемной антенн;  $h_t, h_r$  – высоты электрических центров соответственно передающей и приемной антенн над земной поверхностью, м;  $R$  – расстояние между передатчиком и приемником, м;  $f_{(MHz)}$  – несущая частота, МГц. Среднее квадратическое отклонение  $P_{r,(50)}$  [12]:  $\sigma = 5 \log f_{(MHz)} - 2$  дБ.

Например, если выполняется условие  $h_r > 9$ , соотношение (1) может быть преобразовано к виду, удобному для дальнейшего использования [13] (для наглядности виды потерь обозначены одиночными фигурными скобками):

$$\frac{P_t}{P_{r,(50)}} = \underbrace{l_{f1}}_{l_f} \underbrace{l_{rc}}_{l_c} \underbrace{l_{rc}}_{l_c} \underbrace{\frac{1}{D_t D_r}}_{D_t D_r} \underbrace{\left( \frac{R^2 f}{h_t h_r f_{Eglt}} \right)^2}_{l_b}, \quad (2)$$

где  $l_{f1}, l_{f2}$  – потери в фидерах соответственно передающей и приемной антенн;  $l_{tc}, l_{rc}$  – потери в цепях соответственно передающей и приемной антенн;  $D_t, D_r$  – коэффициенты направленного действия соответственно передающей и приемной антенн (для рассматриваемых направлений распространения и поляризации);  $f$  – несущая частота, Гц;  $f_{Eglt} = 4 \cdot 10^7$  – эмпирический коэффициент, Гц;  $l_t$  – общие потери (в радиолинии);  $l_s$  – потери в системе;  $l$  – потери передачи (в радиолинии);  $l_b$  – основные потери передачи (в радиолинии).

Величины  $l_{tc}, l_{rc}$  определяются по соотношению [14]:  $l_c = 1/\eta = 1 + r_c/r_a$ , где  $\eta$  – коэффициент полезного действия антенны;  $r_c$  – сопротивление потерь, Ом;  $r_a$  – сопротивление излучения антенны, Ом.

С учетом [13], [14] и [15], на рис. 1. приведена блок-схема модели радиолинии «передатчик – приемный канал многоканального пеленгатора с кольцевой антенной решеткой».

В состав приемного канала многоканального пеленгатора с кольцевой антенной решеткой входят: антенный элемент (АЭ)  $M$ -элементной кольцевой антенной решетки; фидер, связанный с потерями  $l_{f1}$ ; радиоприемный тракт. В состав указанного радиоприемного тракта входят: малошумящий усилитель (МШУ); фидер снижения, связанный с потерями  $l_{f2}$ ; радиоприемное устройство (РПУ). Выход РПУ подключен к соответствующему входу  $M$ -канального измерителя пеленга.

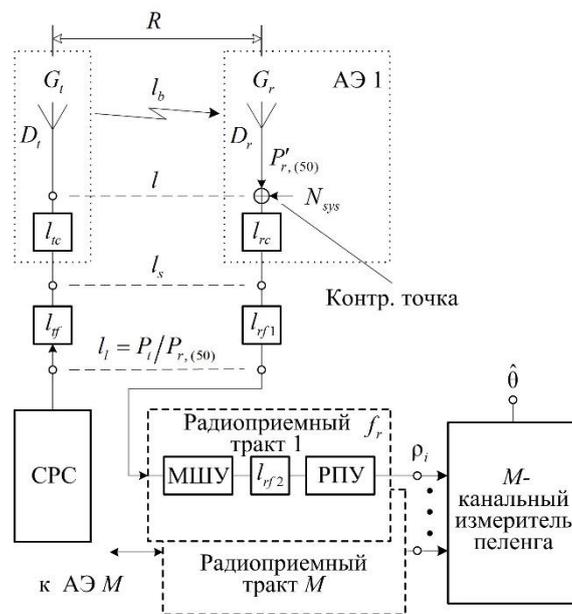


Рис. 1. Блок-схема модели радиолинии «передатчик – приемный канал многоканального пеленгатора с кольцевой антенной решеткой»

Далее принято, что мощность перехваченного сигнала передатчика на входе радиоприемного тракта по (2) равна  $P_{r,(50)}$ . Единственной правильной контрольной точкой для оценки общего рабочего шума приемного канала пеленгатора является клемма эквивалентного свободного от потерь АЭ (клеммы этого АЭ без потерь не существуют физически) [16]. Указанный шум выражен через коэффициент шума приемного канала пеленгатора  $f_{sys}$  относительно уровня теплового шума [16]. Далее введено обозначение мощности перехваченного сигнала активного передатчика в контрольной точке  $P'_{r,(50)}$ :  $P'_{r,(50)} = P_{r,(50)} l_{rc} l_{rf}$ . Отсюда по (2) получено:

$$P'_{r,(50)} = \frac{P_t D_t D_r}{l_{rf} l_{tc}} \left( \frac{h_t h_r f_{EgLi}}{R^2 f} \right)^2. \quad (3)$$

С учетом [14] введено обозначение эквивалентной мощности шума  $N_{sys}$  в контрольной точке, как усредненной по времени мощности, внесенной всеми источниками шума (внутренними и внешними) и подводимой свободным от потерь АЭ к нагрузке, если соответствующие импеданс АЭ и импеданс нагрузки являются комплексно-сопряженными величинами:

$$N_{sys} = k T_0 f_{sys} B,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T_0 = 290$  – принятая эталонная температура, К. Далее определена величина  $f_{sys}$  по соотношению [14]:  $f_{sys} = [P'_{r,(50)} / (k T_0 B)] / [s_0 / n_0]$ , где  $s_0$  – мощность сигнала на выходе РПУ;  $n_0$  – мощность шума на выходе РПУ. Последнее соотношение сводится после подстановки в него  $\rho_i$  к виду:

$$f_{sys} = \frac{P'_{r,(50)}}{k T_0 B \rho_i}. \quad (4)$$

После подстановки (3) в (4) и выполнения преобразования получено:

$$\rho_i = \frac{P_t D_t D_r}{k T_0 f_{sys} B l_{rf} l_{tc}} \left( \frac{h_t h_r f_{EgLi}}{R^2 f} \right)^2 \quad (5)$$

или  $\rho_i = \frac{P'_{r,(50)}}{N_{sys}}$ . Далее принято, что реальная температура АЭ  $T_c$  и реальная температура фидера  $T_t$  равны  $T_0$ ,  $T_c = T_t = T_0$  [16]:  $f_{sys} = f_a - 1 + f_c f_t f_r$ , где  $f_a$  – коэффициент внешнего шума;  $f_c$  – коэффициент шума, связанный с потерями в цепи АЭ  $l_{rc}$ ,  $f_c = l_{rc}$ ;  $f_t$  – коэффициент шума фидера, связанный с потерями  $l_{rf1}$ ,  $f_t = l_{rf1}$ ;  $f_r$  – коэффициент шума радиоприемного тракта.

Коэффициент шума фидера снижения  $f_{r2}$  обратно пропорционален коэффициенту передачи по мощности  $g_{r2}$  [4]:  $f_{r2} = l_{rf2} = 1/g_{r2}$ . С учетом [15],  $f_r = f_{r1} + \frac{f_{r2}-1}{g_{r1}} + \frac{f_{r3}-1}{g_{r1}g_{r2}} = f_{r1} - \frac{1}{g_{r1}} + \frac{f_{r3}}{g_{r1}g_{r2}}$ , где  $f_{r1}$  – коэффициент шума МШУ;  $g_{r1}$  – коэффициент усиления МШУ;  $f_{r3}$  – коэффициент шума РПУ.

Величина  $f_a = 10^{F_a/10}$ , где  $F_a$  – коэффициент внешнего шума, дБ. С учетом [16] и [17], после подстановки в последнее соотношение величины  $F_{am} + 3,4$  получено (применительно к полуволновому диполю в свободном пространстве):  $f_a = 10^{(F_{am}+3,4)/10}$ , где  $F_{am}$  – медианное значение мощности промышленного шума для короткой вертикальной заземленной несимметричной антенны без потерь. Величина  $F_{am}$  определяется по соотношению [16]:  $F_{am} = x - y \log f_{(MHz)}$ , где  $x$  и  $y$  – коэффициенты, принимающие значения в соответствии с категорией окружающей среды. Отсюда для дальнейшего компьютерного моделирования внешних шумов эфира получено:  $f_a = 10^{(x - y \log f_{(MHz)} + 3,4)/10}$ .

Компьютерное моделирование

В [18] отмечено, что чувствительность пеленгатора определяется свойствами пеленгаторной антенной системы, внешними шумами, шумовыми характеристиками приемно-усилительных трактов пеленгатора и используемым алгоритмом пеленгования. В нижней части диапазона ОВЧ размер АЭ оказывает значительное влияние на чувствительность радиопеленгатора [19]. В антенной системе с двойной поляризацией DF-A0085 [20] (Alaris Antennas, ЮАР) общая длина АЭ типа симметричный вибратор, предназначенного для функционирования в полосе 20–300 МГц, приближенно равна 1,3 м. Зависимость коэффициента усиления (КУ) АЭ с вертикальной поляризацией  $G_{r,m}$  от  $f$ , полученная на основе диаграммы [20], приведена в табл. 1.

Таблица 1. КУ АЭ с вертикальной поляризацией

№	$f$ , МГц	$G_{r,m}$ , дБи
1	30	-26,0
2	45	-16,8
3	50	-14,5
4	60	-10,0
5	75	-5,0
6	90	-2,0
7	100	-1,0
8	150	-0,3
9	200	-0,3
10	250	0
11	300	1

Из представленных данных следует, что  $G_{r,m}$  значительно снижается с уменьшением  $f$ . С учетом методики [17]:  $l_{rc} = 1,64 \cdot 10^{-(G_{r,m}/10)}$ .

По (5) проведено компьютерное моделирование в нижней части диапазона ОВЧ [3, 4]:  $f = 30; 45; 60; 75; 90$  МГц;  $G_{r,m} = G_{r,m}(f)$ ;  $P_t = 5$  Вт;  $D_t = 1,5$ ;  $D_r = 1,64$ ;  $B = 25$  кГц;  $l_{fr} = 1$ ;  $l_{tc} = 1,25$ ;  $l_{fr1} = 1$ ;  $h_t = 1,5; 2,5$  м;  $h_r = 10$  м;  $f_{r1} = 5$  (7 дБ);  $g_{r1} = 20$  (13 дБ);  $g_{r2} = 0,5$  (-3 дБ);  $f_{r3} = 14,1$  (11,5 дБ);  $x = 67,2$ ;  $y = 27,7$  (значения  $x$ ,  $y$  приняты для категории окружающей среды «сельская местность» [16]).

Получена зависимость  $\rho_i(R)$  при различных значениях  $h_t$  (рис. 2, 3).

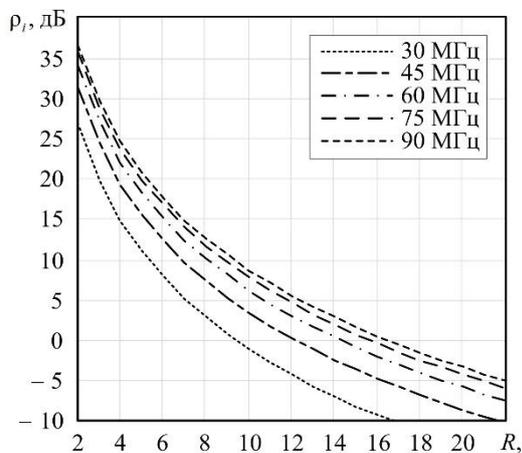


Рис. 2. Зависимость  $\rho_i(R, f)$ ,  $h_t = 1,5$  м

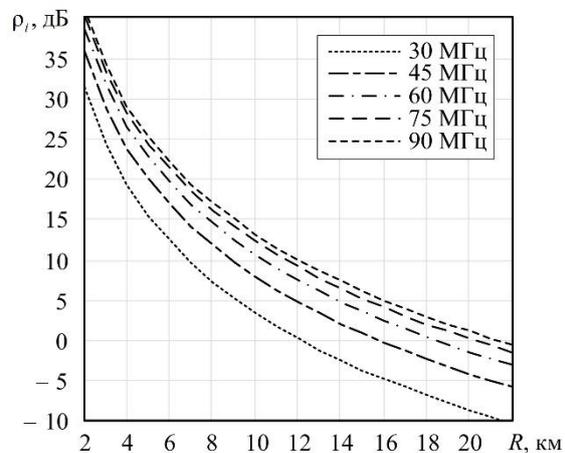


Рис. 3. Зависимость  $\rho_i(R, f)$ ,  $h_t = 2,5$  м

Из диаграмм (рис. 2., 3.) следует:

- увеличение  $R$  и уменьшение  $h_i$  приводят к уменьшению  $\rho_i$ ;
- увеличение  $f$  в полосе 30–90 МГц приводит к увеличению  $\rho_i$  вследствие соответствующего увеличения  $G_{r,m} = G_{r,m}(f)$  от  $-26$  до  $-2$  дБи (табл.) и соответствующего уменьшения  $F_{am} = F_{am}(f)$  [16].

### Заключение

В данной работе предложена модель радиолинии «передатчик – приемный канал многоканального пеленгатора с кольцевой антенной решеткой» диапазона ОВЧ (рис. 1), которая позволяет упростить получение оценки отношения сигнал/шум  $\rho_i$  (5) на выходе приемного канала указанного пеленгатора. Особенностью предложенной модели является использование практически полученных значений КУ АЭ с вертикальной поляризацией  $G_{r,m}$  (табл.):  $G_{r,m} = G_{r,m}(f)$  [20].

### Список использованных источников

1. Martino A. Introduction to Modern EW Systems. 2nd ed. Norwood, MA : Artech House, 2018. 463 p.
2. Ашихмин А. В., Козьмин В. А., Рембовский А. М., Сергиенко А. Р. Технические характеристики и особенности построения автоматических радиопеленгаторов семейства «Артикул» // Спецтехника и связь. 2008. № 2. С. 26–35.
3. Poisel R. A. Modern Communications Jamming: Principles and Techniques. 2nd ed. Norwood, MA : Artech House, 2011. 870 p.
4. Poisel R. A. Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems. Norwood, MA: Artech House, 2014. 807 p.
5. Delisle G. Y., Lefevre J., Lecours M., Chouinard J. Propagation Loss Prediction: A Comparative Study with Application to the Mobile Radio Channel // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1985. Vol. 34, No. 2. Pp. 86–96.
6. Prajesh P., Singh R. K. A Survey on Various Propagation Model for Wireless Communication // 5th IEEE International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies Conference (ICACCT 2011). APIIT SD India, Panipat. India, Delhi: Research India Publications, 2011. Pp. 61–64.
7. Egli J. J. Radio propagation above 40 MC over irregular terrain // Proceedings of the IRE. 1957. Vol. 45, No. 10. Pp. 1383–1391.
8. Suojanen M. Military Communications in the Future Battlefield. Norwood, MA: Artech House, 2018. 224 p.
9. Hooper J. D. Communications electronic countermeasures: an overview. Report No. 1074. Ottawa: Defence research establishment, 1990. 109 p.
10. Frater M. R., Ryan M. J. Communications and Information Systems. Canberra: Argos Press, 2002. 333 p.
11. Schmid H. F. Prediction Model for Multipath Propagation of Pulse Signals at VHF and UHF over Irregular Terrain // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 18, No. 2. Pp. 253–258.
12. Longley A. G. Location Variability of Transmission Loss Land Mobile and Broadcast Systems. Report no. OT 76-87. Boulder, Colorado: Institute for Telecommunication Sciences, 1976. 22 p.
13. Рекомендация МСЭ-R P.341-7: Концепция потерь передачи для радиолиний / Сектор радиосвязи МСЭ. Женева, 2020. 9 с.
14. Weiner M. M. Monopole Antennas. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. 721 p.
15. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А. М. Рембовского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 640 с.
16. Рекомендация МСЭ-R P.372-14: Радишум / Сектор радиосвязи МСЭ. Женева, 2020. 79 с.
17. Skeie B., Solberg B. External man-made radio noise measurements. Norwegian Defence Research Establishment (FFI). FFI-RAPPORT 16/00869. Kjeller: FFI, 2016. 118 p.
18. Артемов М. Л., Виноградов А. Д., Дмитриев И. С., Ильин М. Ю., Подшивалова Г. В. Предельная пеленгационная чувствительность пеленгационной антенной системы // Антенны. 2010. № 12. С. 13–19.
19. Справочник. Контроль за использованием спектра / Сектор радиосвязи МСЭ / Женева, 2011. 746 с.
20. Dual-polarised direction finding antenna array DF-A0085 20 – 3600 MHz [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alarisantennas.com/wp-content/uploads/2017/07/DF-A0085-Version-1.8.pdf> (дата обращения: 12.05.2020).