

## О СВЕРХДАЛЬНОМ МЕТЕОРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ МЕТРОВЫХ ВОЛН

Метеорное распространение радиоволн (МРР) на расстояния до 2000 км известно с начала 50-х годов и достаточно хорошо изучено. Наиболее интенсивно исследования МРР проводились в СССР, США и Канаде - в странах с очень большой протяженностью и территориями со слабо развитой связью, особенно в полярных районах. Ряд работ последних лет [1,5,6] уменьшил существовавший пробел в изучении МРР на коротких (до 400 км) трассах, где имеется неопределенность в выборе ориентации диаграмм направленности (ДН) антенн. К сожалению, результаты этих работ остаются невыполненными, поскольку метеорная связь на небольшие расстояния ещё не получила широкого применения. Двухтысячекилометровый предел для связи за счёт МРР обусловлен тем, что с высоты возникновения метеоров (80...100 км) дальность прямой видимости, ограниченная сферичностью Земли, составляет около 1000 км. В отдельных случаях за счёт высоких метеорных следов и рефракции возможна связь на расстояния до 2400 км. Практически действует линия Хабаровск - Иркутск длиной 2200 км [2]. Но если распространение декаметровых волн возможно путем их неоднократного отражения от ионосферы и земной поверхности, то логично предположить, что такая возможность существует и для метровых волн. О теоретической возможности сверхдального (двухскачкового) МРР упоминал еще Мак-Кинли в своей работе [4] на заре освоения этого вида связи. Однако подробных обоснований он не приводил, а в более поздних работах такая возможность не рассматривалась и даже не упоминалась.

Рассмотрим путь радиоволны из пункта А в пункт В при её отражении от двух метеорных следов  $T_1$  и  $T_2$  и одном отражении от земной поверхности в точке М, показанный на рис. 1. Радиоволна, отраженная метеорным следом  $T_1$ , распространяется вдоль образующих конуса зеркального отражения вокруг следа [2]. Пересечение этого конуса со сферической поверхностью Земли образует для каждого отдельного следа некоторую зону возможного приема (рис. 2). В дальнейшем будем называть эту зону, от которой происходит отражение, полосой освещенности. Отражение считается зеркальным, если разность фаз сигналов, отраженных от различных точек поверхности, не превышает  $90^\circ$  [7]. Согласно формуле Релея, высота неравномерностей  $\Delta h$  на отражающей поверхности при этом не должна превышать

$$\Delta h < \frac{\lambda_w}{8 \sin \gamma}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - угол скольжения;  $\lambda_w$  - длина волны.

В таблице приведены значения углов скольжения для точки М, рассчитанные для высоты метеоров 90 км и соответствующие им высоты неровностей на земной поверхности  $\Delta h_{cp}$ , при которых отражение можно считать зеркальным, рассчитанные для длины волны 7,5 м. Из приведенных данных видно, что если полоса освещенности попадает не на пересеченную местность, то отражение, как правило, можно считать зеркальным. Вызванное сферичностью Земли отклонение полосы освещенности

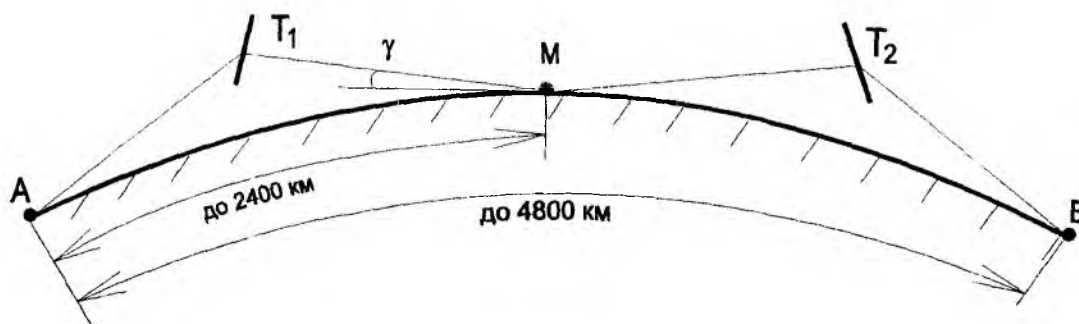


Рис. 1

от плоскости остается в пределах  $\Delta h$  при ее линейном размере  $L$  и площади  $S_3 \approx \pi L^2/4$ . Их численные значения также приведены в таблице.

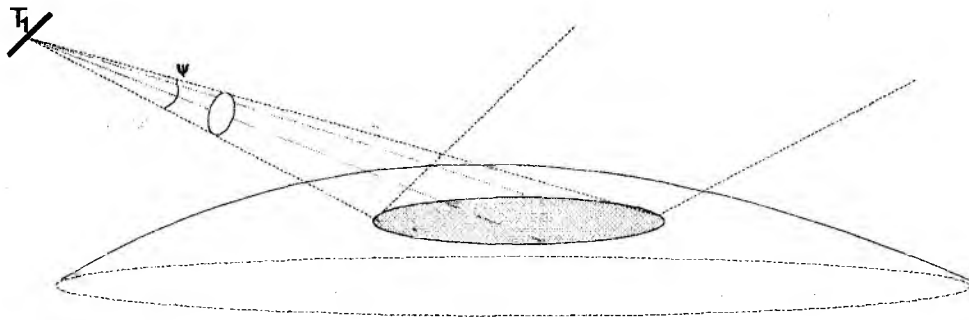


Рис. 2

Зеркально отраженная в точке  $M$  волна продолжает распространение в направлении, заданном ориентацией трассы  $AM$  (проекция пути распространения падающей и отражённой волн на земную поверхность представляют собой прямую линию) и с некоторой вероятностью  $p_m$  встречает метеорный след  $T_2$ , обеспечивающий связь на трассе  $MB$ . Но большинство метеорных следов является ненасыщенными, и так называемое отражение в действительности представляет собой переориентацию лишь незначительной части энергии волны, а большая ее часть беспрепятственно проходит сквозь след. Если полагать, что эта потеря учтена в значении коэффициента заполнения для первого скачка  $\eta_{AM}$ , то для второго такое ослабление отражённого сигнала надо учесть, введя коэффициент тройной удаленности  $k_3$ , поскольку расстояние до метеорного следа  $T_2$  от пункта  $A$  в среднем втрое больше, чем до  $T_1$ . Его можно трактовать как вероятность того, что метеорный след  $T_2$  будет обладать настолько большой электронной плотностью, что даже при значительно ослабленном длинной трассой  $AT_1MT_2$  падающем сигнале обеспечит его приемлемый уровень в точке  $B$ . (Например, как вероятность того, что второй след будет насыщенным). Значение коэффициента тройной удаленности может быть приближенно найдено на основании эмпирического отношения  $\eta = \eta_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^m$ , где  $m = 1, 3 \dots 1, 6$

[2], и принято равным 0,25. Итак, если бы сигнал из пункта  $A$  в пункт  $B$  мог попасть, отразившись от земной поверхности только в точке  $M$ , то коэффициент заполнения на трассе  $AB$  оценивался бы как:

$$\eta_{AB} = \eta_{AM} \eta_{MB} p_m k_3 \quad (2)$$

Коэффициенты  $\eta_{AM}$  и  $\eta_{MB}$  в общем случае не равны, поскольку из-за большой протяженности трассы местное время и связанное с ним количество метеоров для точек  $T_1$  и  $T_2$  может различаться.

$AMB$  не единственный путь распространения из точки  $A$  в  $B$ , поскольку отражение может происходить не только в точке  $M$ , а где угодно в пределах области совместного приема (ОСП) – территории, на которой возможен прием метеорных сигналов от обеих станций (рис. 3). Для определения её площади предположим, что расстояние, на котором возможно отражение от земной поверхности, составляет  $r = 2400$  км от одного из пунктов, а расстояние между пунктами  $2400 < D < 4800$  км. Тогда из рис. 3 площадь области совместного приема  $S$  можно найти как

$$S = 2(S_s - S_{\Delta}), \quad (3)$$

где  $S_s$  – площадь сектора, ограниченного углом  $\rho$ ;  $S_{\Delta}$  – площадь треугольника  $ACD$ .

Отсюда

$$S = 2 \left[ \frac{r^2 \rho \pi}{2\pi} - \frac{r^2 \sin \rho}{2} \right] = r^2 (\rho - \sin \rho). \quad (4)$$

Значения площади для различных длин трасс приведены в таблице (тригонометрические преобразования опущены). Следует заметить, что отражения от различных частей ОСП не равновероятны: наибольшее их количество будет происходить в центральной части, наименьшее у краев. Но для приближенных оценок пока пренебрежём этой неравномерностью.

Оценить количество существующих путей распространения можно следующим образом. Если для конкретной точки М коэффициент заполнения на трассе АМ составляет  $\eta_{AM}$ , то для территории площадью S, достаточно большой по сравнению с размерами полосы освещённости, площадь одновременно "освещаемая" передатчиком пункта А через несколько метеоров составляет

$$S_m = \frac{S}{\eta_{AM}} \quad (5)$$

Количество одновременно существующих полос освещённости в этом случае может быть найдено как

$$N = \frac{S_m}{S_t} \quad (6)$$

где  $S_t$  - площадь полосы освещённости.

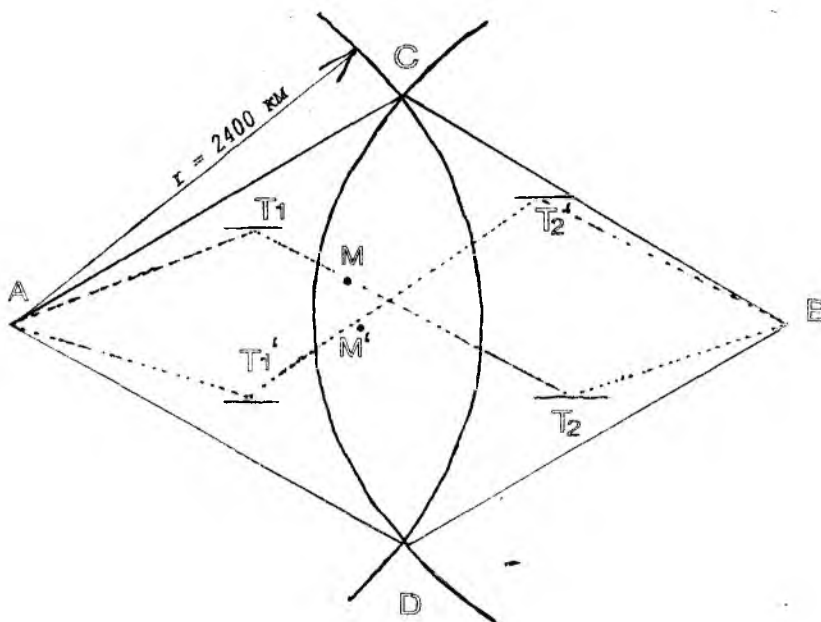


Рис. 3

Для оценки  $S_t$  обратимся к работе [2]. Полученные для трассы длиной 600 км результаты наблюдения совпадений во времени метеорных сигналов, излучаемых из двух разнесенных пунктов, позволяют утверждать, что полоса вытянута вдоль оси трассы, а её размеры составляют в среднем 15 x 70 км (рис. 2). Эти размеры соответствуют ширине луча  $\psi$  примерно  $2,5^\circ$  как в угломестной, так и азимутальной плоскостях. Полагая, что угол  $\psi$  имеет то же значение и для более длинных трасс, можно определить размеры полосы освещённости для них. Результаты расчёта приведены в таблице (простейшие тригонометрические формулы мы опускаем). Для трасс длиной более 3000 км продольный размер полосы освещённости оказывается соизмерим с протяженностью ОСП и ограничивается ею. Количество одновременно существующих полос освещённости N, определённое по (6), также приведено в таблице. Необходимо заметить, что эти полосы на поверхности Земли могут быть неоднородны по напряженности поля приходящего сигнала как во времени, так и по территории, что связано с динамикой образования следа, но в первом приближении этими эффектами можно пренебречь.

Величина телесного угла  $\Psi^2$ , ограниченного лучами, отражёнными от границ полосы освещённости, составляет 0,002 стерadians. Вероятность  $p_m$  может быть приближенно найдена как отношение

$\Psi^2$  к телесному углу  $\beta^2$ , в котором находятся "блестящие" области, содержащие основную массу, полезные для связи метеоров:

$$P_m = \frac{\Psi^2}{\beta^2} \quad (7)$$

Т а б л и ц а

D, км	$\gamma^\circ$	$\Delta h_{cp}, \text{М}$ ( $\lambda=8\text{М}$ )	L, км	$S_{\varphi_2}$ км <sup>2</sup>	$\rho^\circ$	$S, \text{км}^2 \times 10^3$	$S_T, \text{км} \times 10^3$	N	$\eta, \%$
2250	7,4	6	20	310	62	288	17	17	1,5
2500	6,2	8	22	380	59	260	22	12	1,2
2750	4,8	12	27	570	55	200	35	6	0,6
3000	4,4	13	28	620	51	170	52	3	0,3
3250	3,7	15	31	750	47	130	69	2	0,2
3500	2,9	20	36	1 020	43	100	87	1	0,1
3750	2,7	22	38	1 130	38	57	80	1	<0,1
4000	1,7	34	47	1 730	33	43	65	1	<0,1
4250	1,4	40	50	1 960	27	29	50	1	<0,1
4500	1	57	60	2 800	20	13	30	1	<0,1
4750	0,4	200	110	9 500	8	0,72	-	-	-

Угломестная образующая телесного угла  $\beta_y$  для трассы длиной 1000 км составляет около  $2^\circ$  (разность высот метеорной области 20 км, дальность до неё 500 км), что меньше  $\Psi$ . Поэтому вероятность  $P_m$  определяется азимутальной ориентацией отражённого луча и распределением "блестящих" зон. Заметим, что для трасс более 3000 км азимутальная образующая телесного угла  $\beta_a$  также соизмерима с  $\Psi$ , кроме того, сферичность отражающей поверхности приводит к расширению отражённого от неё луча (как при прохождении его через рассеивающую линзу) и росту вероятности  $P_m$ . На основании этих оценок можно предположить, что вероятность  $P_m$  близка к единице и не влияет существенно на коэффициент заполнения на сверхдлинной трассе.

В таблице приведён результирующий коэффициент заполнения, найденный по формуле (2) при условии, что  $\eta_{AM}$  и  $\eta_{MB} = 5\%$ . Из приведенных данных видно, что он быстро убывает с расстоянием и для трасс более 4000 км составляет менее 0,1 %.

Цифра не впечатляющая, но на наш взгляд, перспективы, открывающиеся при использовании сверхдального МРР, заслуживают того, чтобы его изучать. Это связь на метровых волнах без спутников и кабеля с использованием сравнительно несложной аппаратуры и без больших энергетических затрат на расстояния до 4000 км. Возникающий канал обладает взаимностью и стабильным временем распространения, что делает его пригодным для сличения эталонов времени. Следует также отметить, что метеорный канал устойчив к различным аномалиям в ионосфере и не зависит от наличия или отсутствия спутника на орбите.

**Список литературы:** 1. Антипов И.Е. Оптимизация ориентации диаграмм направленности антенн метеорных радиотехнических систем с целью повышения их пропускной способности в условиях коротких трасс. Дисс... канд. техн. наук. Харьков, 1996. 144 с. Машинопись. 2. Кащеев Б.Л., Бондарь Б.Г. Метеорная связь. Киев: Учебно-методический кабинет Министерства высшего образования, 1989. 76 с. 3. Кащеев Б.Л., Бондарь Б.Г., Коваль Ю.А., Горбач В.И. Метеоры сегодня. Киев 1997. -196 с. 4. Мак-Кинли Э. Методы метеорной астрономии М.: Мир, 1964. 384 с. 5. Weitzen J.A. Communicating Via Meteor Bust at Short Range IEEE Trans. on com., Vol. COM-35, N 11, Nov 1987. P. 1217-1221. 6. Карпов А.В., Наумов А.В., Терешин С.Н. Моделирование условий метеорной радиосвязи на коротких метеорных радиолниях // Информационный Бюллетень Украинской Астрономической Ассоциации. Киев: Наукова книга, 1996. N 9. С. 56-57. 7. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа 1967 244 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 5.05.99

