

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ РАЗВЯЗКА: ВЗГЛЯД ЭКСПЕРТА

Оценка требований по кросс-поляризационным характеристикам антенн земных станций спутниковой связи

**В. БОБКОВ
М. ЕФИМОВ
А. КИСЕЛЕВ
В. НАГОРНОВ**

В настоящее время в системах спутниковой связи и вещания (СССВ) [1] существует практика многократного использования имеющейся полосы. Это осуществляется следующими взаимно совместимыми процедурами:

- пространственный разнос лучей: работа ведется в одних и тех же полосах частот при использовании спутниковых антенн, соединенных с различными ретрансляторами и имеющих направленные и разнесенные в пространстве лучи;
- развязка по поляризации (работа с двумя видами поляризации): передача ведется в одних и тех же полосах частот через спутниковые антенны, связанные с разными ретрансляторами радиочастотных сигналов с двумя ортогональными поляризациями.

Повторное использование частот за счет поляризационной развязки в С-диапазоне в радиолиниях с круговой поляризацией применяется достаточно давно, начиная с космического аппарата (КА) Intelsat-V [2]. Однако ухудшение качества сигнала вследствие деполяризации, обусловленной влиянием метеорологических факторов, приводит к необходимости дополнения станций устройствами поляризационной компенсации. Такие устройства разработаны [1] и применяются в основном в составе земных станций (ЗС) телепортов, в сетях типа VSAT. В то же время сложность и высокая стоимость их реализации препятствуют их широкому применению.

В России СССР с поляризационным уплотнением до недавнего времени не создавались. Первая подобная система развернута на базе КА «Ямал-100», за-

пуск которого был осуществлен в 1999 г. В рамках действующей СССР «Ямал» разворачиваются сети VSAT с поляризационным уплотнением.

Многократное использование частот при поляризационном разделении сигналов в сетях, образуемых современными спутниками-ретрансляторами, выдвигает соответствующие требования к кросс-поляризационным характеристикам антенн, которые образуют радиолинии Земля – КА (линия «вверх») и КА – Земля (линия «вниз»).

Определяющим фактором при повторном использовании частот КА в одной зоне обслуживания на поверхности Земли является уровень поляризационной развязки сигналов в «смежных» стволах ретранслятора, т. е. в стволах с одинаковым частотным диапазоном.

При принятой для большинства СССР России в С-диапазоне (6/4 ГГц) круговой поляризации на радиолиниях кросс-поляризационные характеристики определяются прежде всего коэффициентом эллиптичности КЭ передающей и приемной антенн, образующих эти радиолинии, т. е. КЭ антенн КА и ЗС.

Имеющиеся на рынке антенны КА и ЗС различных диаметров, особенно радиусом до 5 м, имеют довольно широкий разброс значений КЭ. Причем до настоящего времени цель – получить поляризационную развязку в отечественных СССР при изготовлении антенн не ставилась ни для ЗС, ни для КА. Впервые такая задача в ее наиболее полном виде – достижение поляризационной развязки при повторном использовании частот, в том числе для ЗС типа VSAT, была поставлена при создании СССР «Ямал».

В данной статье будет рассмотрен комплекс факторов, влияющих на уровень поляризационной развязки в каналах связи при повторном использовании частот, а также требований к коэффициенту эллиптичности антенн ЗС, которые обеспечивают работу в СССР с поляризационным уплотнением. При этом будут учтены имеющиеся значения КЭ антенн КА, пороговых свойств применяемых и перспективных модемов земных станций, а также принципы организации спутниковых радиосетей фиксированной спутниковой службы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Коэффициент эллиптичности по оси и в секторе углов по уровню -1 дБ диаграммы направленности для антенн КА, работающих в С-диапазоне, и антенн ЗС типа VSAT разных производителей, наиболее распространенных в сетях ФСС России, в настоящее время обычно составляет 0,7–0,85.

Воздействие мешающего сигнала от земной станции, работающей в «сопряженном» по поляризации стволе КА, происходит вследствие приема мешающего сигнала от ЗС «сопряженного» ствола из-за конечной величины поляризационной развязки как на линии «вверх» («смежная» ЗС – КА), так и на линии «вниз» (КА – «основная» ЗС).

Влияние этих двух радиолиний на уровень поляризационной развязки определяется индивидуальными характеристиками трасс распространения и оборудования КА и ЗС, а также режимом работы радиолиний. Предположим, что режимы работы ЗС и сопряженных стволов ретранслятора КА (K_u , K_z , ЭИИМ и т. д.) и характеристики оборудования и трасс распространения одинаковы. Тогда влияние обоих путей образования помех равнозначно.

Неравномерность уровней (мощностей) сигналов, занимающих одну и ту же частотную полосу в соседних сетях (смежных стволах) при свободном (независимом) назначении в них частот, может достигать 10 дБ и более. Она обусловлена применением в сетях антенн различного диаметра (1,5–7 м и более), различными коэффициентами кодирования ($R=1/2, 2/3, 3/4, 7/8$ и др.) и видами модуляции (ФМ-2, ФМ-4, 8PSK, QAM-16 и др.).

В табл. 1 представлены результаты расчета значения уровня подавления шумовой помехи и измеренные уровни подавления для сигналов ФМ-2 и ФМ-4 при мешающем сигнале аналогичной структуры на той же частоте и различных коэффициентах кодирования для ухудшения нормированного отношения сигнал/шум на 0,5 дБ.

При добавлении шумовой помехи с мощностью Δ (приращение мощности шума) отношение мощности сигнала к мощности шума $N_1=S/N$ принимает вид $N_2 = S/(N + \Delta)$. При этом выражение $S/\Delta = S/N * 1/(A-1)$, где A – заданное ухудшение нормированного отношения сигнал/шум N_1/N_2 , определяет отношение мощности сигнала к приращению мощности шума, т. е. требуемую кросс-поляри-

зационную развязку, определяемую антеннами КА и ЗС.

Требуемое ослабление мешающего сигнала относительно полезного на входе демодулятора зависит от вида модуляции и кодирования и для часто используемых в настоящее время сигналов в спутниковых сетях находится в пределах от 11,0 до 17,5 дБ.

При свободном назначении частот сигналов, их структуры и уровней в сетях «смежных» стволов (или образуемых различными КА) возможен наихудший случай совпадения сигналов как по частоте, так и по структуре. Используя данные табл. 1, определим требуемое ослабление мешающего сигнала, обусловленное поляризационной развязкой, с учетом идентичных режимов работы смежных стволов РТР и ЗС. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Требования к уровню поляризационной развязки на спутниковых радиолиниях, работающих с поляризационным уплотнением, в общем случае оказываются достаточно высокими (см. табл. 2). Причем жесткость требований оказывается тем выше, чем более сложен по структуре используемый сигнал. В то же время при взаимной координации сигналов, работающих в каналах с повторным использованием частот, т. е. при взаимном ограничении выбора параметров рабочих сигналов в этих каналах, требования к уровням поляризационной развязки резко снижаются (например, при взаимной координации уровней сигналов они могут быть ослаблены на 10 дБ).

Таким образом, с учетом взаимного влияния сигналов в сопряженных стволах, определяемого рассмотренными факторами, необходимое значение кросс-поляризационной развязки должно составлять $\geq 24 \div 30,5$ дБ.

Таблица 1

Параметр	Значение			
	ФМ-2	ФМ-4		
Кодирование	Сверточное			
Коэффициент кодирования	1/2	1/2	3/4	7/8
Измеренное отношение S/N в отсутствие мешающего сигнала, дБ	5,2	5,1	5,8	7,6-8,0
Расчет требуемого ослабления уровня мешающего сигнала S/Δ для A = 0,5 дБ, дБ	14,3	14,2	14,9	16,7-17,1
Измеренное значение ослабления уровня мешающего сигнала относительно полезного для A = 0,5 дБ, дБ	11,1	14,4	15,8	17,1-17,5

Таблица 2

Вид сигнала	ФМ-4			
	ФМ-2	ФМ-4		
Кодирование	1/2	1/2	3/4	7/8
Требуемое подавление мешающего сигнала:				
- на входе демодулятора, дБ	11,1	14,4	15,8	17,5
- с учетом двух путей образования мешающего сигнала, дБ	14,1	17,4	18,8	20,5
- с учетом неравномерностей уровней сигналов в стволах РТР, дБ	24,1	27,4	28,8	30,5

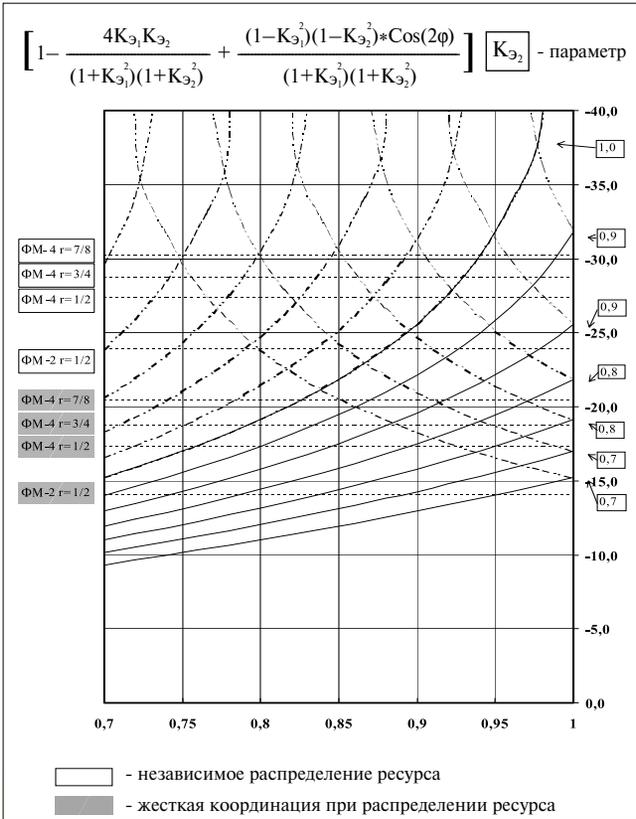


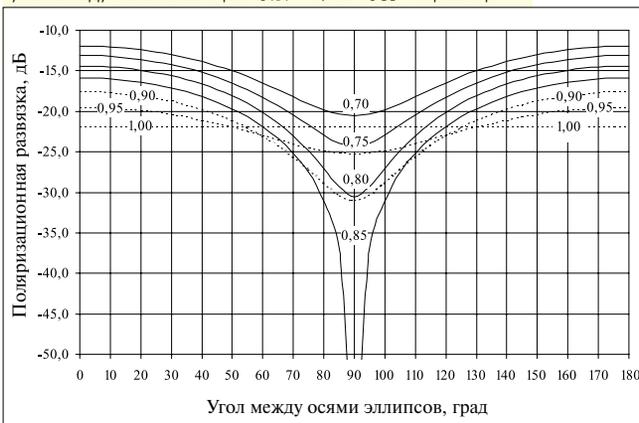
Рис. 1. Поляризационная развязка для разных K_{Σ} при соосном ($\varphi=0$) и ортогональном ($\varphi=\pi/2$) расположении эллипсов поляризации

● **Кросс-поляризационная развязка**

Известно, что при идеальной круговой поляризации развязка для радиоволн с противоположными направлениями вращения вектора напряженности поля – правым и левым – стремится к бесконечности.

Вследствие различного рода конструктивных особенностей выполнения антенн вместо идеальной круговой поляризации всегда имеет место эллиптическая, которая может быть представлена как суперпозиция идеальной круговой и линейной [3]. Положение линейной составляющей напряженности поля определяет положение осей эллипса поляризации антенны.

Рис. 2. Зависимость уровня поляризационной развязки от угла между эллипсами при $K_{\Sigma \text{КА}} = 0,85$. $K_{\Sigma \text{ЗС}}$ - параметр



Соответственно, отвлекаясь пока от влияния среды пространства, можно считать, что для двух антенн, образующих радиолинию, поляризационная развязка определяется взаимным положением линейной составляющих векторов напряженности поля, т. е. осей эллипсов поляризации обеих антенн (поскольку круговые составляющие обеспечивают «идеальную» развязку).

При параллельном расположении соответствующих осей (больших и малых) обеих эллипсов развязка будет минимальной, при взаимно перпендикулярном – максимальной. В соответствии с чисто геометрическими представлениями указанная минимальная развязка будет обеспечиваться в достаточно широком секторе углов расхождения осей обоих эллипсов, а максимальная – только в одной точке. То есть при проектировании радиолиний оценивать уровень поляризационной развязки необходимо в общем случае исходя из минимального ее значения, если не предусмотрена соответствующая подстройка взаимного положения эллипсов поляризации в процессе эксплуатации путем изменения положения облучателя одной из антенн радиолинии.

Эллипс поляризации антенны меняется при отклонении антенны от направления на корреспондента. Причем меняются не только величина K_{Σ} , но и положение осей этого эллипса, которые обусловлены влиянием кросс-поляризационных паразитных составляющих излучения, лежащих вне основных (Е и Н) плоскостей излучения антенны. Поэтому при оценке поляризационной развязки, создаваемой антеннами ЗС, должна учитываться и ошибка наведения антенны ЗС на КА [4-7].

При работе в одной точке на ГСО нескольких КА (так называемое кластерное размещение КА) с ортогональными поляризациями необходимо также брать в расчет ошибку наведения на «свой» КА и угловое расхождение с КА, по отношению к которому осуществляется поляризационное разделение.

Основные соотношения

Ослабление γ мешающего сигнала при поляризационной развязке в зависимости от коэффициентов эллиптичности обеих антенн радиолинии (e_1 и e_2) и угла φ между соответствующими осями эллипсов поляризации этих антенн в общем случае описывается выражением [4]:

$$\gamma(\varphi) = 0,5 * \left[1 - \frac{4e_1e_2}{(1+e_1^2)(1+e_2^2)} + \frac{(1-e_1^2)(1-e_2^2)}{(1+e_1^2)(1+e_2^2)} \cos(\varphi) \right] \quad (1)$$

Минимальная развязка соответствует значению $\varphi=0$ (параллельное расположение соответствующих осей эллипсов поляризации), максимальная – значению $\varphi = \pi/2$.

Из выражения (1) видно, что принципиально можно получить $\gamma = 0$, т. е. сколь угодно высокую развязку при любых значениях $K_{\Sigma 1}$ и $K_{\Sigma 2}$, если удастся добиться $K_{\Sigma 1} = K_{\Sigma 2}$, т. е. при равенстве коэффициентов эллиптичности обеих антенн и ортогональном расположении соответствующих осей эллипсов поляризации. Графики зависимости (1), соответствующие случаям $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi/2$, представлены на рис. 1.

Для примера на рис. 2 представлен график зависимости уровня поляризационной развязки от угла между осями эллипса поляризации двух антенн (КА и ЗС) для получения заданной степени развязки γ при значениях коэффициентов эллиптичности $K_{\Sigma \text{КА}} = 0,85$ и $K_{\Sigma \text{ЗС}}$ в диапазоне от 0,7 до 1,0. Данный график характеризует необходимую точность

сопряжения осей эллипсов по углу при проведении подстройки.

Получение высоких значений поляризационной развязки в радиолиниях принципиально возможно, если в процессе эксплуатации сохраняются стабильные условия, обеспечивающие сохранение первоначально установленных параметров, либо при обеспечении соответствующей подстройки величины K_3 и взаимного положения осей эллипсов поляризации антенн при изменении упомянутых условий (см. рис. 1). При этом должны быть учтены все возмущающие факторы – геофизические, метеорологические, климатические и пр., влияющие на трассу распространения сигналов на линиях «вверх» и «вниз» с учетом различия несущих частот.

Достижение необходимых высоких уровней развязки при круговой поляризации требует обеспечения значений $K_3 \rightarrow 1$ и создания в связи с этим прецизионных конструкций антенн (см. (1) и рис. 1). Расхождение комплексных амплитуд двух векторов (линейной поляризации), образующих круговую поляризацию, не должно превышать сотых долей дБ. Столь малые разности комплексных амплитуд векторов, составляющих круговую поляризацию, практически невозможно сохранить в процессе эксплуатации радиолинии вследствие влияния метео- и геофизических факторов.

С другой стороны, из формулы (1) и анализа графиков, аналогичных представленному на рис. 2, для $K_{ЭКА} = 0,7, \dots, 1,0$ следует, что при некоторых условиях, а именно взаимном сопряжении осей эллипсов поляризации обеих антенн и подборе величины K_3 в относительно широком секторе углов (единицы и десятки градусов) возможно достижение весьма высоких уровней поляризационной развязки и при относительно невысоких абсолютных значениях K_3 антенн. Подстройку указанных параметров принципиально необходимо осуществлять оперативно, в процессе эксплуатации.

Таким образом, достижение высоких уровней поляризационных развязок в СССВ требует разумного компромисса между сложностью, высокой трудоемкостью изготовления и стоимостью антенн с $K_3 \rightarrow 1$ и введением оперативной

подстройки соответствующих их параметров. Критерием оптимальности, очевидно, является показатель «эффективность/стоимость» СССВ в целом.

На рис. 1 изображены кривые поляризационной развязки для различных K_3 при соосном и ортогональном взаимном расположении их эллипсов поляризации совместно с требуемыми уровнями поляризационной развязки для различных сигналов, взятыми из табл. 2 для случая жесткой взаимной координации уровней сигналов (выравнивание уровней сигналов в радиолиниях) и при свободном их назначении (разница в 10 дБ). При соосном расположении эллипсов поляризации минимальная развязка, обеспечиваемая существующими антеннами ЗС КА, позволяет работать при жесткой координации, в лучшем случае только сигналом ФМ-4 с кодированием $R=1/2$ и в отдельных точках (плоскостях) на краях зон обслуживания, где для КА $K_3 \geq 0,95$. Исключение составляют антенны с $K_3 \geq 0,94$, для которых возможна работа с сигналами ФМ-4 с $R = 1/2; 3/4$ и $7/8$ в центре зон обслуживания и на краях, где для КА $K_3 \geq 0,9$, но при жесткой координации. В отдельных случаях, где для КА $K_3 \geq 0,95$ (в отдельных точках на краях зон обслуживания), возможна работа многофазными сигналами.

При независимом распределении частотного ресурса в сетях, образуемых сопряженными по поляризации стволами КА, требования к уровням поляризационной развязки существенно повышаются (до 10 дБ) и могут быть выполнены только подстройкой эллипсов поляризации (см. рис. 1). Причем подстройке должны быть подвергнуты как значение K_3 , так и положение осей эллипсов поляризации.

Максимальное поле допуска на сопряжение осей эллипсов поляризации по углу достигается при равенстве их K_3 (см. рис. 1, 2). Поле допуска по углу составляет $\pm 4^\circ$ даже для значения развязки $\gamma \geq 35$ дБ и коэффициента эллиптичности $K_3 = 0,75$, т. е. достаточно велико (грубая настройка) и вполне достижимо для современных антенн довольно простыми средствами. Для меньших значений γ и больших K_3 оно резко возрастает и составляет уже десятки градусов, что позволяет ставить вопрос о подстройке положения эллипсов поляризации под конкретные условия работы радиолиний даже для ЗС с антеннами малого диаметра.

Наиболее жесткий допуск на K_3 необходим для высоких значений развязки (см. рис. 2). Например, для приведенного значения $\gamma = 35$ дБ при критерии точности совмещения осей эллипсов по углу не хуже $\pm 2^\circ$ допуск на K_3 (абсолютное значение) лежит в пределах от $\pm 0,025$ (для $K_3 = 0,7$) до $\pm 0,03$ (для $K_3 = 0,9$), т. е. составляет $3,6 \div 3,3\%$. Для значений $\gamma = 30,5$ дБ требования к допуску по равенству значений K_3 уже существенно слабее. Следовательно, могут быть несколько снижены и требования к точности совмещения осей эллипсов при крайних значениях этого допуска. Так, для $K_3 = 0,7$ допуск составляет $\pm 0,04$ (абсолютное значение) при точности совмещения осей эллипсов не хуже $\pm 2,5^\circ$, а для $K_3 = 0,9$ – $\pm 0,05$ (абсолютное значение) при точности совмещения осей не хуже $\pm 10^\circ$. То есть относительные значения допуска по равенству значений K_3 для этой величины развязки находятся в пределах $(5,7 \div 5,6)\%$. Допуск на совмещение осей эллипсов поляризации по углу «разменивается» на допуск по равенству значений КЭ (см. рис. 1, 2). Поэтому приведенные значения допуска являются ориентировочными.

Таким образом, для большинства существующих антенн земных станций спутниковой связи и телевидения (K_3 не более 0,8) поляризационная развязка при работе с соответствующим КА может быть резко улучшена за счет соответствующей подстройки осей эллипса поляризации антенн ЗС. (Например, путем поворота облучателя вокруг своей оси, не говоря уже о подстройке коэффициента эллиптичности.) При жесткой координации связных ресурсов могут быть реализованы практически все режимы работы.

В то же время при K_3 бортовых антенн, равном 0,9, и K_3 земных станций, равном 0,85–0,95, при введении режимов подстройки поляризационных характеристик ЗС по величине K_3 и ориентации осей эллипсов поляризации проходят все виды работы (сигналов), в том числе многофазные, при независимом назначении связного ресурса в «смежных» сетях.

● Заключение

Реализация поляризационной развязки в СССР и режимов подстройки поляризационных характеристик антенн ЗС требует решения ряда научно-технических задач, основными из которых являются:

- определение параметров трасс распространения сигналов и оценка их влияния на уровень поляризационной развязки, уточнение абсолютных значений и пределов изменения величины КЭ и поворота осей эллипсов поляризации, в том числе путем набора статистики флюктуаций этих величин на трассах «вверх» и «вниз» с учетом метеорологических факторов, а также многолучевости распространения радиоволн, особенно при работе под малыми углами места;
- жесткая привязка абсолютного и относительного положений осей эллипсов поляризации антенн КА на прием и передачу в рабочем диапазоне частот и углов диаграмм направленности; при этом желательно иметь значения КЭ антенн КА во всей зоне обслуживания до уровня не менее 0,9;
- исследование и разработка антенн ЗС, допускающих независимую регулировку в процессе эксплуатации величины КЭ на прием и передачу в пределах 0,7–0,95;
- исследование и разработка антенн ЗС, допускающих регулировку положения осей эллипсов поляризации;
- системная реализация процессов оперативной индикации, анализа и подстройки поляризационных характеристик антенн ЗС непосредственно в процессе эксплуатации, автоматизация процессов указанной подстройки;
- оптимизация режимов работы и способов организации спутниковых радиолиний и стволов РТР КА с учетом возрастающего использования сигналов с все более сложными структурами и необходимостью достижения взаимонезависимости работы этих каналов и стволов при поляризационном уплотнении.

На сегодняшний день удовлетворительные результаты по поляризационной развязке могут быть достигнуты путем использования в составе связных ЗС антенн 2,4–9,3 м производства НПО «ПМ-Развитие» (Красноярск-26), у которых для серийно выпускаемых антенн значение $K_3 \geq 0,94$. В совокупности с координацией распределения частотно-энергетического ресурса это позволяет обеспечить требуемую кросс-поляризационную развязку и увеличить пропускную способность системы почти в 2 раза. ◀

Литература

1. Satellite Communications Fixed – satellite service // International Radio Consultative Committee, International Telecommunication Union. – Geneva, 1988.
2. Freeman, Roger L. Reference manual for telecommunications engineering / Roger L. Freeman.
3. Петрович Н. Т., Камнев Е. Ф., Каблукова М. В. Космическая радиосвязь / Под ред. Н. Т. Петровича. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Сов. радио, 1979.
4. Антенны эллиптической поляризации. Теория и практика: Сборник статей под ред. А. И. Шпунтова. – Иностранная литература, 1961.
5. Спутниковая связь и вещание: Справочник / Под ред. Л. Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1997.
6. Antenna Engineering Handbook. Third edition, Richard C. Johnson editor, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
7. Advanced technology in Satellite communication antennas. Electrical&Mechanical desing. Takashi Kitsuregawa. Artech House. Boston London.