

Снова за горизонт, часть первая

А. ГОЛЫШКО, канд. техн. наук, г. Москва

*"Не разменивайся по мелочам —
заглядывай сразу за горизонт."*

**(Из учебника по стратегическому
менеджменту)**

На страницах журнала уже рассказывалось о загоризонтных радиолокационных станциях (ЗГРЛС), использующих отражающие свойства атмосферы

нашей планеты, в том числе её ионосферы, и использующихся для обнаружения целей на огромных расстояниях. Как известно, отражающие свойства

атмосферы используются и для организации связи на значительных расстояниях. Однако одно дело узкополосная любительская или профессиональная КВ-радиосвязь, другое — радиосредства с большой пропускной способностью, помехозащищённостью и достаточно высоким качеством связи, как, например, УКВ-радиосвязь или радиорелейные линии.

Как известно, основным недостатком обычных радиорелейных линий связи является ограниченность интервала между станциями, обусловленного пределами прямой видимости 30...60 км, в зависимости от высоты установки антенны, хотя прямая видимость между возвышенными точками в горах может быть значительно больше. В свою очередь, УКВ-радиосвязь зависит от рельефа местности, имеет небольшой радиус действия и подвержена воздействию промышленных помех, но...

...Особенности распространения электромагнитных волн имеют свои

рекорды. В частности, в УКВ-диапазоне наблюдалось следующее:

— в 1950 г. между горой в Крыму и кораблём Черноморского флота был установлен вечный рекорд дальности радиорелейной связи (260 км) с помощью станции Р-400 (диапазон радиочастот 1550... 1750 МГц), но это чисто инженерный рекорд;

— 18 октября 1975 г. Рийн Мунтвеверф (Нидерланды) уловил шведский канал ДМВ Е34 (Паяла), осуществив на тот момент самый дальний приём (1851 км);

— 13 июня 1989 г. житель Кеаау (Гавайи) отыскал УКВ-сигнал, переданный радиотелевизионной станцией (Мексика). Дальность составила 4081 км;

— В 90-е годы Фернандо Гарсиа, житель области близ Монтеррея (Мексика), неустанно ловил передачи станций, разделённых расстоянием свыше 1600 км. Эксперты объясняли этот факт особо удачной конфигурацией атмосферы, сформированной над Мексиканским заливом;

— В ночь на 20 июня 2007 г. радиолюбители восточного Массачусетса Джем Леманн, Кейт МакГиннс и Рой Бартоу приняли УКВ-сигнал южной Флориды (удалённость — 1931 км);

— 17 декабря 2007 г. поляк Масей Луговский (Гура-Кальвария) зафиксировал сигнал радио ВВС Шотландии (Оркнейские острова) на частоте 93,7 МГц. Условия для распространения волны, преодолевшей Балтийское и Северное моря, простояли два дня. Вообще, декабрь 2007 г. особо благоприятствовал энтузиастам радиосвязи;

— 27 и 28 сентября 2017 г. любители северо-восточной Европы наблюдали необычно дальний приём ДМВ. Рекорд (1798 км) зафиксирован в Томачов Маховики (Польша);

— сегодня действует РРЛ длиной 165 км в горах Киргизии, что также является достижением радиоинженеров.

Очевидно, часть вышеизложенного произошла неспроста. Отдельные случайные события имели под собой вполне системную основу, которая ещё раньше стала базисом развития нового направления в телекоммуникациях — тропосферной радиосвязи (ТРС), использующей явления отражения, рефракции электромагнитной волны тропосферой. В 70-е годы XX века технология ТРС была частично вытеснена спутниковой радиосвязью, но отнюдь не исчезла.

Собственно, сам эффект загоризонтного распространения УКВ-сигналов был установлен ещё в 40-е годы прошлого века, и без радиолокации здесь не обошлось. Во время Второй мировой войны персонал войск союзников отмечал паразитные отклики импульсов РЛС (война стала причиной быстрого развития радиолокации), приходящие с непонятных направлений. Провели исследования, поняли природу, разработали оборудование, и первые сообщения об устойчивом приёме передач на УКВ на расстояниях, существенно превышающих прямую видимость, появились уже к началу 1950-х годов. Собственно, до развития

волоконно-оптических линий связи и спутниковой связи ТРС не имели альтернативы, поэтому в США, а затем и в СССР начались работы по тропосферной связи.

Создание тропосферных радиорелейных линий (ТРРЛ) стало возможным благодаря использованию в качестве ретранслятора неоднородностей диэлектрической проницаемости в нижних слоях тропосферы (объём переизлучения). Тропосферой именуют слой воздуха, занимающий область в пределах 10 км от поверхности Земли. Тропосферная связь задействует диапазоны ДМВ и СМВ (350...8400 МГц). Сигналы с другими радиочастотами хуже отражаются воздушными слоями.

Для установления связи луч сигнала направляют заведомо выше горизонта. Объём переизлучения образуется пересечением диаграмм направленности антенн двух станций на высоте до 10...15 км в зависимости от широты. Энергетически станции ТРС (СТРС) чрезвычайно неэффективны, поскольку излучаемый радиолуч в основном проходит мимо антенны принимающей станции и уходит в космос. Лишь ничтожная доля энергии радиоволн случайным образом как бы загибается за препятствия в силу разных случайных непредсказуемых процессов в тропосфере, зависящих от погоды, климата региона, рельефа местности, длины волны и пр. Канал тропосферной связи вносит существенно большее затухание сигнала по сравнению с затуханием в свободном пространстве, и для этого канала характерен многолучевой характер распространения. В итоге приёмной антенны достигает лишь малая толика излучённой энергии (примерно триллионная часть), однако ТРС оправдывает себя в условиях значительно изрезанной и гористой местности.

Механизм тропосферного рассеяния достаточно сложен, он зависит от многих географических, климатических, атмосферных и сезонных факторов. Собственно, абсолютно точное объяснение механизма отражения/преломления электромагнитной волны в тропосфере отсутствует. Зато учёные выработали набор концепций, увязанных со статистикой распространения электромагнитных волн в атмосфере и призванных выявить принцип действия ТРС. Кстати, одной из теорий и устанавливается явление переизлучения волны. Зато учёные установили устойчивую корреляцию между электромагнитным излучением и атмосферными парами влаги. Также выяснилось, что передача сигнала в диапазоне 2 ГГц обеспечивает наилучшее соотношение сигнал/шум. В дополнение к вышесказанному необходимо добавить, что методика создания ТРРЛ обеспечивает превосходную защищённость связи ввиду узкой направленности луча, что, разумеется, было особо отмечено военными. Типовое значение дальности ТРРЛ составляет 300 км, предельное — 1000 км. Имеет место и мёртвая зона — 50...100 км.

Индекс преломления, показывающий, что будет происходить с излучённой энергией в тропосфере, опреде-

ляют погодные атмосферные факторы: влажность, температура и плотность. С ростом высоты индекс преломления линейно снижается. Самые лучшие условия для ТРС создают медленно поднимающиеся влажные массы, что весьма характерно для водных поверхностей. Механизм их возникновения также донные изучается, а методики их точного предсказания отсутствуют.

Преимущества тропосферных линий заключаются не только в простоте развёртывания станций, помехозащищённости и повышенной дальности связи, но и в достаточно большой пропускной способности, борьба за которую продолжается и поныне. К недостаткам следует отнести необходимость преодоления больших затуханий в пространстве и, как следствие, повышенные уровни мощности на передающей стороне и высокая чувствительность приёмников, необходимость использования антенн с высоким коэффициентом усиления. Для борьбы с быстрыми замираниями используются различные методы разнесённого приёма (по пространству, частоте, углу прихода, времени). Наибольшее распространение получили пространственное и частотное разнесение и их комбинации.

В 1950-х годах Пентагон был озабочен возросшей дальностью действия советской бомбардировочной авиации, которая уже могла нанести бомбовый удар по США через Северный Полюс. Однако узнать о полёте бомбардировщиков американцы не могли — их просто нечем было засечь. Поэтому первая в мире система связи, использующая тропосферное распространение УКВ, родилась как средство обеспечения надёжной связи сети радиолокационных станций на территории Канады. Линия РЛС, известная под названием Pinetree Line, была построена в начале 1950-х годов и предназначалась для предотвращения внезапного вторжения авиации СССР. Позже были построены ещё две подобные линии.

До 1955 г., когда ТРС была введена в строй, связь осуществлялась с каждой радиолокационной станцией индивидуально в КВ-диапазоне. Как следствие, перерывы связи были частым явлением, и естественным решением проблемы казалось использование радиорелейных линий в количестве 50 РРС, что, однако, было бы непомерно дорого. В течение ряда лет различные исследовательские организации искали средства для преодоления ограничения связи на УКВ расстоянием прямой видимости, пока в Bell Labs после периода интенсивных исследований не предложили решение, использующее комбинацию известного явления тропосферного распространения, вновь разработанных электровакуумных приборов и последних достижений радиотехники.

Опытная ТРРЛ была установлена на территории Ньюфаундленда (Канада) в конце 1953 г. на расстояние более 240 км между Сент-Антони и Гандером без ретрансляторов, чтобы проверить возможность нового способа работать на УКВ за пределами прямой видимости. Передача велась на частоте

500 МГц при мощности 500 Вт и на частоте 4 ГГц при мощности 10 Вт. Лучшие результаты были получены на нижней частоте, хотя на частоте 4 ГГц сигнал тоже был чёткий. Результаты были столь обнадеживающими, что решено было использовать новое оборудование даже до окончания всех испытаний. Наиболее важным было то, что появилась надёжная связь, не подверженная возмущениям в ионосфере. Для увеличения надёжности технические требования к новой системе были заложены значительно выше, чем полученные при испытаниях результаты. Первая тропосферная линия, названная Pole Vault, находилась в эксплуатации с января 1955 г. и до середины 1963 г. Станция TPC принадлежала канадской телефонной компании Bell.

Поскольку в открытии РЛС наблюдались разрывы, в радиолокационном поле были установлены вспомогательные радары (Gap Filler), которые были подключены к общей сети связи посредством тропосферных станций AN/FRC-39, которые представляли собой уменьшенную версию первоначального оборудования с новыми усовершенствованиями. После расширения системы общее число тропосферных станций в системе достигло 17, а их технические характеристики приведены в таблице.

Аппаратура уплотнения в ТРПЛ разбивала 36 телефонных каналов с полосой пропускания 0,2...3, 4 кГц. Эти 36 каналов занимали полосу частот 12...160 кГц. Первая группа из 12 каналов — 12...60 кГц, вторая группа — 60...108 кГц и третья группа — 108...160 кГц. Каждый телефонный канал мог, в свою очередь, уплотняться аппаратурой тонального телеграфирования (12 или 24 канала). Кроме того, были три служебных канала (300...2800 Гц), которые использовались только радиорелейщиками для связи между станциями. Служебные каналы занимали спектр от 300 до 9500 Гц.

С сентября 1967 г. эксплуатация оборудования ТРПЛ на площадках РЛС от военных была передана коммерческим организациям. Тропосферные станции работали в этой системе до закрытия РЛС или до замены их на спутниковые станции связи.

Линия раннего предупреждения (DEW) официально берёт начало с 15 февраля 1954 г., когда президент Эйзенхауэр подписал закон о её строительстве. Линия DEW была самой северной и наиболее развитой (с точки зрения оперативности и достоверности), из трёх радиолокационных линий ПВО США и проходила по Алеутским островам, северу Аляски и Канады, по югу Гренландии, а также по части восточного побережья Канады и США. Существующие каналы связи не могли обеспечить достаточные коммуникации, и по заявке ВВС компании Western Electric была поставлена задача проектирования и строительства более совершенной сети связи. Так родилась ТРПЛ системы связи White Alice Communications System (WACS).

White Alice состояла из ТРПЛ, а также РЛ прямой видимости. Строительство было чрезвычайно дорогим, первоначальная оценка стоимости строительства была около 30 млн долл. США, но к моменту ввода в строй первой очереди (25 станций) расходы уже составили 140 млн. Всего было построено 49 станций. Проектирование осуществила компания AT&T, строительство вела Western Electric Company. По завершении строительства общие расходы превысили 300 млн.

Параметр	Gap Filler	Pole Vault
Частота (средняя), МГц	900	650
Расстояние между станциями (примерно), км	96	290
Излучаемая мощность, кВт	1	10
Размер антенны, м	9	18
Усилительный элемент — клистрон	Воздушное охлаждение	Водяное охлаждение
Мощность сигнала на входе клистрона, Вт	10	25
Обслуживающий персонал	5 чел.	15 чел.

Часть указанных выше расходов была следствием недооценки специалистами компании Western Electric требований по работе и обслуживанию станций. По их предварительным расчётам для обслуживания станции необходимо было шесть человек. Считалось также, что для станции достаточно одного генератора мощностью 25 кВт. На самом деле оказалось, что меньшим числом, чем 20 человек, не обойтись, и мощность энергоустановки должна быть от 120 до 180 кВт. Пришлось также строить площадки для авиации, чтобы доставлять всё необходимое для жизнедеятельности станций. Поскольку в местах строительства отсутствовали источники электроэнергии, пришлось строить дизельные электростанции и, естественно, ёмкости для хранения дизтоплива и масла. Жилые помещения для обслуживающего персонала тоже были нужны. Во многих местах техзона на вершине горы соединялась с жилой зоной внизу посредством канатной дороги. Строительство с участием 3500 специалистов велось в течение трёх лет.

Первые станции были введены в действие в конце 1956 г., и первый телефонный разговор по тропосферной линии White Alice состоялся 29 ноября 1956 г. В полном объёме эта огромная система заработала 26 марта 1958 г. По окончании строительства система White Alice перешла под управление войск связи США.

В начале 60-х годов прошлого века страх перед СССР из области авианалётов переместился в область ракетного нападения, и White Alice стала обслуживать элементы системы предупреждения уже о ракетном нападении, постепенно прирастая новыми

станциями. Интересно, что хотя White Alice была военной системой связи, в течение всей своей недолгой активной жизни (около 20 лет) её обслуживал исключительно гражданский персонал — сначала Federal Electric Company, затем RCA Service Company и, наконец, ИТ. В наши дни на Аляске на сохранившиеся элементы линии DEW водят экскурсии, за деньги, разумеется.

Самая первая аппаратура TPC, используемая в White Alice, AN/FRC-45, была создана компанией Collins Radio Corp. Это была система сдвоенного приёма, которая в дальнейшем была заменена на систему счётверённого приёма AN/FRC-39 компании Radio Engineering Labs (REL). Выходные каскады передатчиков были разработаны в трёх вариантах: мощностью 1 кВт, 10 кВт и 50 кВт. Приёмник имел на входе параметрический усилитель. Параболические антенны были также в трёх вариантах: круглые (тарелки) диаметром 9 м, с прямоугольным зеркалом 18×18 м и самые большие прямоугольные размерами 36×36 м. На большинстве пролётов использовались антенны размерами 18×18 м и передатчики мощностью 10 кВт. На коротких промежутках применялись антенны диаметром 9 м и передатчики с выходной мощностью 1 кВт. На больших расстояниях использовались самые большие антенны и передатчики мощностью 10 кВт. На трёх промежутках использовались выходные каскады мощностью 50 кВт. Первоначальная система передачи GS-18081 обеспечивала 132 телефонных канала. Следующая система FRC-39 — 252 канала. Последняя TPC работала на Аляске до середины 80-х годов. Это участок от Boswell Bay (BSW) до Cape Yakataga (CYT). Остальные TPC были заменены спутниковыми терминалами в 1981 г.

Стоит сказать несколько слов о разработке приведённых выше TPC. С целью преодоления проблемы замраний в этом проекте, компания Collins Radio Corp. (в настоящее время — Rockwell) применила технологию приёма на разнесённые в пространстве антенны. Следует отметить, что приём на разнесённые антенны уже применялся раньше в магистральной КВ-связи (первый послевоенный советский радиоприёмник для магистральной радиосвязи "Крот" также был рассчитан в том числе и на сдвоенный приём). В архитектуре компании Collins Radio это осуществлялось посредством двух антенн, каждая из которых была подключена к отдельному приёмнику. Вероятность того, что оба приёмника одновременно потеряют сигнал, была существенно снижена. Это был прорыв, который позволил тропосферной радиосвязи стать главным кандидатом для связи на участках ответвления.

Тем не менее испытания ТРПЛ, построенной в штате Иллинойс между Рокфордом и Стритором, обнаружили, что, несмотря на пространственный

разнос, замирения сигнала всё же имеют место. Кроме того, позднейшие испытания в Арктических широтах показали наличие более сильных замираний сигнала, особенно в осенние месяцы. Однако надёжность тропосферной радиосвязи казалась достаточно хорошей для соединительных линий, где расстояние между площадками не превышало 150 км, но проблема замираний мешала возможности использования тропосферных пролётов для магистральной линии. В частности, промежуток Бар Майн — Форт Юкон составляет более 360 км. Влияние замираний сигнала можно было снизить увеличением мощности передатчика, однако для такого интервала требовалась мощность, которая в то время не могла быть технически обеспечена. Таким образом, ТРС была разработана для основной линии связи с командным пунктом.

В то же время, когда первые системы сдвоенного приёма уже были изготовлены и смонтированы в Арктике, исследования в попытках решения проблемы замираний продолжались. Пространственный разнос известен как сдвоенный, так как существуют два независимых пути сигнала между передающей станцией и приёмной. Предполагалось, что удвоение количества путей сигнала с двух до четырёх значительно бы снизило явление замираний. Однако простое увеличение числа приёмных антенн не дало результата. Результат появился позже, когда компания Radio Engineering Labs разработала четырёхкратную систему со второй передающей антенной, на которую работал второй передатчик,

настроенный на частоту, отличную от частоты первого передатчика (частотный разнос). Передающая антенна № 1 обеспечивает два независимых пути к приёмным антеннам, в то время как передающая антенна № 2 обеспечивает два дополнительных пути к двум приёмным антеннам. С четырьмя отдельными путями разительно была уменьшена вероятность того, что все четыре радиоприёмника потеряют сигнал одновременно. Это было достижение, которое позволило разработать СТРС большой дальности для участка Остров Бартер — Форт Юкон. В то же время был достигнут прогресс в производстве клистронов большой мощности (50 и даже 100 кВт!), что и было немедленно использовано для организации ТРПЛ. И вскоре все ТРС системы были модернизированы для четверённого приёма.

В 1961 г. был установлен рекорд по дальности связи 1111 км (!) с использованием станций СТРС AN/FRC-47, которые разработала и изготовила компания General Electric для организации самой длинной однопролётной линии через море Баффина на участке между Туле (Гренландия) и мысом Дайер (Канада). Эта станция работала в диапазоне 355...455 МГц. На каждой стороне использовались два передатчика мощностью по 50 кВт каждый. Коэффициент шума приёмника — 8 дБ. Параболические антенны — размерами 36×45 м. ВЧ-ствол уплотнялся с помощью 24-канальной аппаратуры фирмы Lenkurt Electric. По воспоминаниям современников, большая часть каналов не использовалась из-за того, что выбранная система разноса не

обеспечивала компенсацию замираний. Официальное название этого проекта — DEWDROP.

В 1965 г. для увеличения надёжности системы коммуникаций авиабазы была построена вторая тропосферная линия Туле — Халл Бич. Протяжённость второй однопролётной линии — 942 км. Аппаратура AN/FRC-101 была разработана фирмой REL. Мощность передатчиков на обеих станциях — 100 кВт. Размеры антенн — 36×36 м. Работала линия на частотах 355...455 МГц. Приёмные устройства состояли из нескольких приёмников с параметрическими усилителями.

ТРПЛ использовались во многих странах. Одной из крупнейших была система связи НАТО ACE High, которая, помимо 41 PPC, включала в себя 49 ТРС, работала в диапазоне 832,56...959,28 МГц, предоставляла 250 радиоканалов (каждый обеспечивал коммуникацию 12 абонентов), построена в 1956 г. Состояла из 82 СТРС мощностью до 10 кВт, расположенных на территории девяти стран: Норвегии, Дании, Западной Германии, Великобритании, Франции, Голландии, Италии, Греции и Турции.

Разумеется, в нашей стране всё изложенное выше также разрабатывалось, изготавливалось и использовалось для создания ТРПЛ, в том числе и весьма протяжённых. Об этом в следующий раз.

По материалам computer-museum.ru, setinoid.ru, r91353ba.beget.tech/brig.html, kik-sssr.ru, trrlsever.org, trcvr.ru, habr.com