

## Сигналы авиагеорадара.

Отрыв антенны георадара от земли принципиально меняет электродинамику взаимодействия радиоволны с поверхностью и с подповерхностными объектами. В некотором смысле, с точки зрения работы антенн, ситуация упрощается, мы переходим в хорошо изученную область обычных антенн в воздухе, на основные параметры которых земля не оказывает влияния.

Положение антенн на поверхности в обычной геолокации связано с непрогнозируемым изменением параметров земли в ближней зоне антенны, что случайным образом меняет ее основные характеристики: входной импеданс, сопротивление излучения, частотный диапазон, диаграмму направленности.

Но наземная геолокация по сравнению с авиационной имеет одно преимущество - упрощается или исчезает проблема пространственной селекции объекта. Наличие границы раздела сред приводит к возникновению достаточно узкой диаграммы направленности в зондируемую среду, фазовый центр которой совпадает или близок к положению центра антенны георадара на земной поверхности.

Однако в георадиолокации существует проблема отражения от внешних, выступающих над поверхностью предметов или неровностей почвы. Хотя основную энергию импульса наземная антенна направляет в среду, но поскольку затухание подземных сигналов очень велико, то часто воздушные сигналы, излучаемые небольшими боковыми лепестками, бывают более мощными, поскольку не испытывают затухания. Диаграмма направленности наземного георадара определяется диэлектрической проницаемостью среды и ее проводимостью. Например, при работе с поверхности воды отражений от берегов георадар не видит, а на сухом песке отчетливо фиксируются все деревья.

Для борьбы с внешними отражениями мы, в свое время, пошли стандартным путем, которым идет большинство разработчиков георадаров - конструированию экранированных антенн. Оказалось, что для сверхширокополосных сигналов георадара экранировка может быть выполнена только в виде безэховой камеры, накрывающей передающую и приемную антенны. В ней должен быть обеспечен «мягкий вход» волны в поглотитель, который не должен влиять на антенну, а значит удален от нее и иметь специальную структуру проводимости, чтобы минимизировать отражение назад.

Рассмотренные нами остальные способы экранировки, например, металлическое зеркало, не прошли – они были сильно резонансным из-за конечных размеров, соизмеримых с размером антенны. Оставалась только миниатюрная безэховая камера.

Главный разработчик Александр Щекотов назвал ее «гравицапой».

Выбрали размеры двух «гравиц» так, чтобы они помещались в багажник «четверки» П. Морозова. А. Щекотов положил в основу конструкции принцип надежности, и заказал ее в мастерских института из восьмислойной фанеры. Сооружение было надежным, но очень тяжелым. Мы использовали «гравицапу» долго, и все ждали, когда же она, наконец, сотрется об асфальт.

Потом решили, что собственных разработок достаточно, и заключили договор с кафедрой радиофизики МАИ, которые занимаются поглотителями для наших «самолетов-невидимок».

Антенна, ограниченная по габаритам прежней «гравицапой» и сделанная «по всей науке», обеспечивала поглощение внешней волны только на 30 дБ! При наших 120 дБ реального потенциала это ничего не значит, внешнее отражение лишь

немного ослабевает. Это для антенны длиной 1 метр, а какого размера «сарай» потребуется для шестиметровой антенны?

В результате полученного опыта пришли к выводу: экранировка антенн георадара – это бесперспективно. Надо идти путем математической селекции сигналов, для чего есть все предпосылки – для воздушных и подземных объектов сигналы имеют хорошую «окраску», т.е. они хорошо различимы.

Мы продали на сторону только одну «гравицану», говорят, что она работает на железной дороге где-то в Сибири, и что покупатели довольны, но сами уже не рассматриваем их как элемент георадара.

Мы используем простейшую схему авиагеорадара, которая ближе всего к схеме наземного радара, когда точка подповерхностного зондирования определяется положением его над землей. При таком зондировании плоской поверхности, когда из закона геометрической оптики «угол падения равен углу отражения» следует, что на летательный аппарат вернется только один луч, падающий вертикально, все остальные уйдут в открытое пространство. Подобная схема зондирования с самолета описана еще в работах М.И. Финкельштейна по определению толщины льда, на относительно небольшую глубину. К тому же, ледяные поля имеют, чаще всего, ровную поверхность.

Проблему селекции отражений от поверхностных объектов: гор, холмов, обрывов, линий электропередач и т.д., рассеивающих волны во все стороны и часть из которых может фиксироваться приемником авиагеорадара с произвольного направления, будем возлагать на математику, как и в наземном случае. Для примера приведем несколько отличий подземного и воздушного сигналов, которые можно положить в основу селекции:

1. Воздушные сигналы всегда имеют обратную к зондирующему импульсу полярность. Переворот полярности (или фазы) объясняется тем, что все наземные объекты имеют диэлектрическую проницаемость больше воздуха.
2. Если отраженный сигнал имеет полярность зондирующего импульса, то это гарантирует его подповерхностное происхождение, поскольку он возникает на переходе из более плотной среды в менее плотную, например, из толщи воды в дно.
3. Воздушные сигналы не расплываются, в отличие от подповерхностных, изменение их времени задержки при прямолинейном полете с одинаковой скоростью описываются гиперболами.

Антенная система поднятого в воздух георадара либо вообще не имеет, либо имеет слабовыраженную направленность в сторону земной поверхности, и не она определяет диаграмму направленности для сигналов подземного зондирования.

Сделаем следующие предположения.

1. Поверхность земли плоская.
2. Радар поднят на высоту  $H$ , значительно превышающую размеры антенной системы  $L$  и среднюю длину излучаемых радиоволн  $\lambda$ , соизмеримую с  $L$ .

$$H \gg L \sim \lambda$$

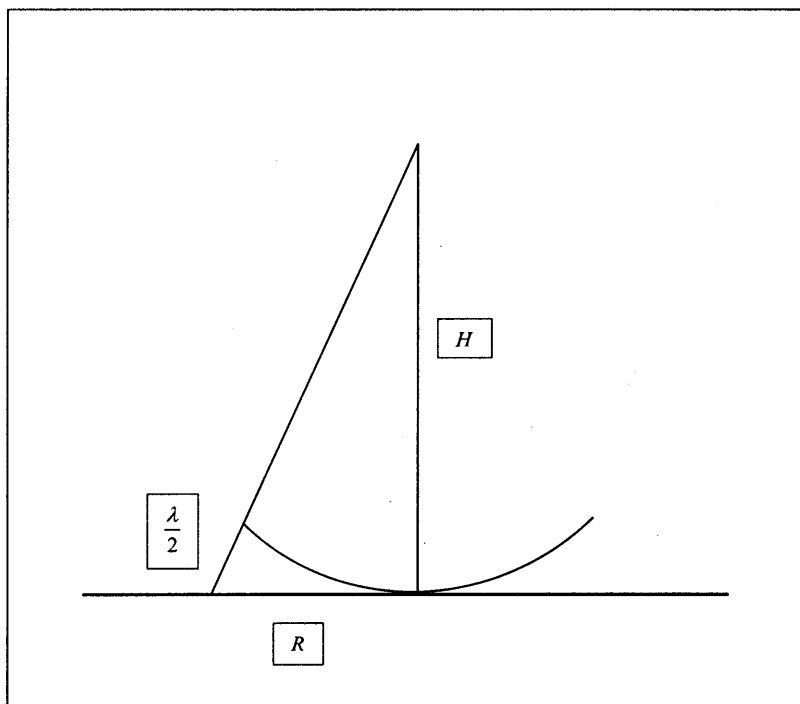


Рис. 10. Расчет зоны Френеля.

Используя приближение геометрической оптики и приближение точечного источника, будем считать, что на приемную антенну вернется только один луч, падающий на землю вертикально. Все остальные лучи по законам отражения от плоской поверхности уйдут во внешнее пространство и не будут зафиксированы. Используем физическую волновую интерпретацию луча как пространства, ограниченного первой зоной Френеля, на границах которой фаза волны меняется на  $\pi$  относительно центра, чтобы найти радиус пятна  $R$ , которое формирует подземный сигнал для авиагеорадара. Он следует из теоремы Пифагора (см. рис. 10).

$$R = \sqrt{H\lambda}$$

Оценим ту часть мощности передатчика, которая будет сосредоточена на земле в окружности радиуса  $R$ .

Предположим, что антенна передатчика изотропна и излучает во все стороны с одинаковой интенсивностью. Площадь  $S_1$  сферы радиуса  $H$  равна

$$S_1 = 4\pi H^2$$

Площадь  $S_2$  зоны Френеля определится формулой

$$S_2 = \pi H \lambda$$

Соотношение мощности сигнала на земле  $P_1$  в окружности радиуса  $R$  к общей мощности излученного во все стороны сигнала  $P_0$  равно соотношению площадей

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{\lambda}{4H}$$

В таблицах приведены оценки пятна на земле и потери мощности сигнала за счет расходимости в воздухе на длине волны 12 м.

Высота полета, м	Радиус пятна на земле, м
20	16
50	25
100	35
200	50
1000	110

Высота полета, м	Ослабление, амплитуда линейной шкалы, разы	Ослабление, децибелы
20	2.5	7
50	2.9	10
100	4	12
200	6.7	15
1000	25	26

Потери сигнала на отражение при вертикальном падении на землю с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9$  оценим в 6 дБ, потери на геометрическую расходимость волны в 4 дБ, что в сумме составит 10 дБ.

Учитывая большой реальный потенциал наземного варианта прибора (>120 дБ), который был взят за основу авиагеорадара, можно заключить, что дополнительные энергетические потери авиационного прибора незначительны и приведут, при прочих равных условиях, к потере глубины не более 10%.

Подземные сигналы, принимаемые авиагеорадаром, имеют такой же вид и структуру, с которыми работает обычный наземный георадар.

Но авиационный радар имеет два принципиальных отличия от наземного: присутствие отражения от вертолета (или другого ЛА) и отражения от поверхности земли.

Вертолет - такой же радиолокационный отражающий объект, как и земля. Но близость его расположения к радару дает другой, отличный от удаленной земли сигнал. Вертолет дает мощное многомодовое отражение, следующее сразу за зондирующим импульсом передатчика. Углы передачи и приема радиоволн здесь существенно шире, чем для наземных и подземных сигналов.

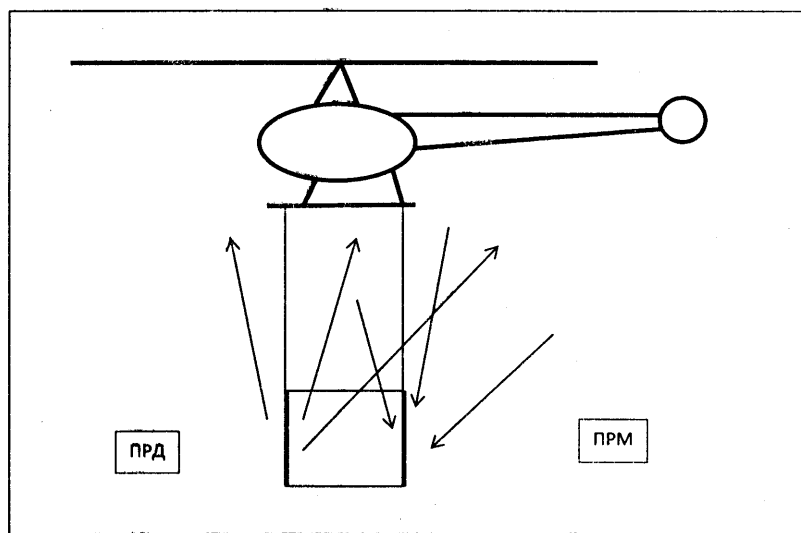


Рис. 11. Формирование отражения от вертолета.

Но этот сигнал может быть отселектирован путем выбора высоты полета. Необходимо подняться на такую высоту, на которой сигнал от вертолета разделится по времени прихода с сигналом от поверхности земли. Это второй сигнал, отличающий авиационный и наземный георадары. Он несет информацию о высоте полета ЛА, а сам прибор может выполнять функции радиовысотомера. Как показывает практика, для того, чтобы выйти из зоны вертолетного отражения, необходимо подняться на высоту 30 -50 м, в зависимости от типа вертолета, длины подвески и длины антенны.

На рис. 15 приведена запись реального сигнала авиагеорадара при полете над озером, фотография которого помещена на последней странице обложки.

Высота полета менялась от 40 до 50 м, о чем говорит неровная линия поверхности воды, которая, естественно, отмечает только изменение высоты полета.



На рисунке цифрой 1 показан зондирующий импульс, максимум которого имеет отрицательное значение. Это важно, поскольку полярность отраженного импульса несет информацию о границе отражающей среды.

Коэффициент отражения плоской волны при вертикальном падении на границу раздела сред описывается формулой

$$R = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

Здесь  $n_1$  - показатель преломления первой среды, из которой падает волна,

$n_2$  - показатель преломления второй среды, на которую падает волна.

Цифрой 2 показано мощное отражение от вертолета, которое имеет смещение в область положительных значений. Это влияние ближнего квазистатического поля антенн, которые расположены на расстоянии 6 м от вертолета.

Цифрой 3 показано отражение от поверхности воды, импульс имеет положительное значение. Следом за ним идут отражения от слоев воды с различной температурой и плотностью. Это свойство всех водоемов со стоячей водой. Купальщики, которые ныряли в такой водоем, это хорошо себе представляют.

На рис. 15 можно наблюдать еще один эффект, помеченный цифрой 7, который заключается в появлении отрицательной низкочастотной компоненты поля. Она возникает на плавном уменьшении диэлектрической проницаемости воды на взвесах, которые плавно переходят с глубиной в ил. Впервые мы столкнулись с таким явлением на озере Чебаркуль при поиске Челябинского метеорита.

Этот эффект был нами исследован, результаты опубликованы в статье: В.В. Копейкин, В.Д. Кузнецов, П.А. Моро-

зов, А.В. Попов, А.И. Беркут, С.В. Меркулов, В.А. Алексеев. Георадарное обследование предполагаемого места падения фрагмента метеорита Челябинск в озеро Чебаркуль. // Геохимия, 2013, № 7, с. 636-642.

Максимальная глубина, наблюдаемая в этом пересечении озера, составила 9.6 метра.

## Эксперименты.

### Первое включение.

*Установка уже готова, и предстоит первое включение. Тщательно проверяешь всю схему и готовишь пути возможного отступления: расчищаешь дорогу до общего рубильника, рядом с собой ставишь огнетушитель. В таких случаях православные верующие осеняют себя крестным знамением, предаваясь во власть высших сил.левой рукой прикрываешь глаза, правой резко включаешь тумблер. Готов ко всему: к хлопку, взрыву, огню, дыму, удару током... Но нет, все тихо, только гудят трансформаторы. Убираешь руку от лица и смотришь на приборы. Амперметр зашкален, но предохранители выдержали. С облегчением включаешь тумблер. Хорошо! Первое включение состоялось! Установка будет жить!*

Первое, что следует сделать – это убедиться, что на вертолете вообще можно принимать сигналы георадара. Для этого на опорных лыжах с помощью досок установили комплект наземного георадара ЛОЗА со штатными антеннами 1.5 метра.

При включении передатчика в наушниках слышались завывания: его антенна и антенна связи с диспетчером оказались слишком близко. Связь была возможна, но во время переговоров этот вой транслируется в диспетчерскую.

Пилот Дмитрий Киселев решил:

- Ничего, я буду выходить на связь как можно реже. Полетим за Оку, а потом будем решать проблему помех.

Запись сигналов того полета приведена на рис. 12. Поверхность земли мы увидели, но ничего более. «Звон» был просто чудовищным. Вертолет находился в ближней зоне антенн и сам стал их составной частью. Основной вывод

после первого включения: сигнал от поверхности земли принимается, но антенны георадара следует удалить от вертолета.

### **Ромбические антенны.**

На территории института много ромбических антенн ионозондов, направленных в небо. Ионосферщики утверждают, что эти антенны хорошие и очень широкополосные: - Конструкция - четыре провода, соединенных последовательно, по два в каждом плече. Антенна заканчивается согласованным сопротивлением в 600 Ом, что обеспечивает в каждом проводе режим бегущей волны.

Режим бегущей волны! Это ведь то то , что надо для георадара!

Сделали, проверили, разочаровались. Это получше, чем «бабочка», для какой-то определенной среды ее даже можно согласовать и избавиться от «звона», но небольшое изменение внешних параметров катастрофично. «Ромбы» не составили на земле конкуренцию антеннам Ву-Кинга.

Но, может, у нас не получилось с «ромбами» только потому, что они были близко к поверхности, а сейчас, в воздухе, когда земля далеко, они начнут работать? Привлекает их простота – обычный кабель, нагруженный на один резистор.

Ромбические антенны длиной 6 метров изготовили и подвесили под вертолетом на пластиковой раме. Фото вертолета с антенной помещено на лицевой обложке книжки, а запись сигналов приведена на рис. 13.

Хотя сигнал стал «живым», и даже где-то стали проглядывать подземные неоднородности, но все губит сильный «звон». Кроме режима бегущей волны, здесь проявляются

еще и конечные размеры проводников, конструктивно соединенных в форме рамки, что вызывает паразитные колебания сигнала. После эксперимента решили возвращаться к резистивным диполям Ву-Кинга.

### **Антенны Ву-Кинга.**

Алгоритм разработки антенн Ву-Кинга понятен и пройден нами для наземных радаров неоднократно. Необходимо подобрать цепочку резисторов для того, чтобы избавиться от «звона». Понятно, что номиналы резисторов для воздушной антенны должны быть больше, но насколько? Ответ на этот вопрос может дать только эксперимент, «метод последовательных приближений».

Для того, чтобы получить первую опорную точку, с которой потом все данные будем сравнивать, взяли готовую наземную антенну длиной 4 м., оказавшуюся под рукой.

Из записи выяснилось, что «звон» сигнала недопустимо высок, что для нас не стало неожиданностью.

Следующую резистивную антенну длиной 6 м изготовили специально для авиагеорадара. По сравнению с наземной, номиналы всех резисторов увеличили в 6 раз. Запись сигнала приведена на рис. 14.

Как следует из рисунка, «звон» антенны заметно уменьшился, но остался все еще высоким.

В следующей антенне номиналы резисторов увеличили еще в два раза, и получили записи, показанные на рис. 15.

Сигналы, излученные и принятые этими антеннами, не имеют «звона» и их качество стало соизмеримым с сигналами наземного георадара.

Это позволило прекратить эксперименты с антеннами воздушного базирования и поставить вопрос об опытной эксплуатации авиагеорадара.