



Разрешающая способность антенны GPR

автор Reinaldo Alvarez Cabrera

Сколько антенн у меня должно быть?

Мы все слышали данный вопрос, особенно от начинающих в области технологии георадара (GPR). Люди, начинающие осваивать данную технологию поражены, что надо иметь так много различных антенн для применения казалось бы к одним и тем же вещам, исследующие землю.

Какую(ие) антенну(ы) я должен выбрать?

Получение подходящего набора данных имеет огромное значение, поэтому выбор соответствующей радиолокационной антенны в каждом случае является обязательным. Существует бессчётное количество таблиц, разбросанных по литературе и Интернету, дающих спорную информацию и оставляя неосторожных пользователей в полном замешательстве и с чувством отчаяния. Что еще хуже, производители не очень любезны на выдачу параметров, лепестков диаграммы направленности или любых других важных данных для антенн, которые они продают. В данной статье я постараюсь обратить внимание на один из многих важных факторов, способствующих успешной съемке георадаром - на разрешение антенны.

В первую очередь немного теории

Что же в конце концов означает разрешение? - Bob Pease сказал бы, что он имел дело с GPR и я хотел бы только сказать Хорошо! В георадаре существует два типа разрешений: вертикальное, которое обращено прямо вниз в землю и горизонтальное, которое является параллельным к плоскости поверхности линии исследования. Иными словами, мы должны быть в состоянии вычислить, или, по крайней мере, оценить минимальное расстояние объектов друг от друга по вертикали и горизонтали, которые мы пытаемся исследовать. Итак, давайте ознакомимся с каждым из этих терминов отдельно и посмотрим, сможем ли мы извлечь некоторый смысл каждого из них.

Вертикальное разрешение не что иное, как наименьшая разница во времени между двумя объектами, которые может получить георадар перед тем как начнет «видеть» их обоим как один. Немного загадочно, не правда ли? Ну нет, не совсем. Георадар измеряет только время, пересчет в глубину происходит позднее исходя из информации диэлектрической проницаемости среды. Но если мы рассмотрим, для ясности, что георадар измеряет расстояние, то мы можем сказать, что вертикальное разрешение это наименьшее расстояние в направлении, перпендикулярном к поверхности, где могут быть два объекта, которые можно рассмотреть и различить как отдельные объекты. См. Рисунок 1, чтобы получить более полное представление, вертикальное разрешение отмечено как “Vr”.

Горизонтальное разрешение является более понятным, потому что расстояние измеряется в единицах длины, а не в единицах времени. Итак, горизонтальное разрешение является минимальным расстоянием между двумя объектами в одной горизонтальной плоскости, параллельной плоскости, в которой георадар «видит» оба объекта как отдельные. Проще говоря, это минимальное горизонтальное расстояние между двумя объектами на одной и той же глубине, перед тем как радар объединил их в единичное событие. См. Рисунок 1 для того чтобы лучше осмыслить понятие,



горизонтальное разрешение отмечено как “Hr”.

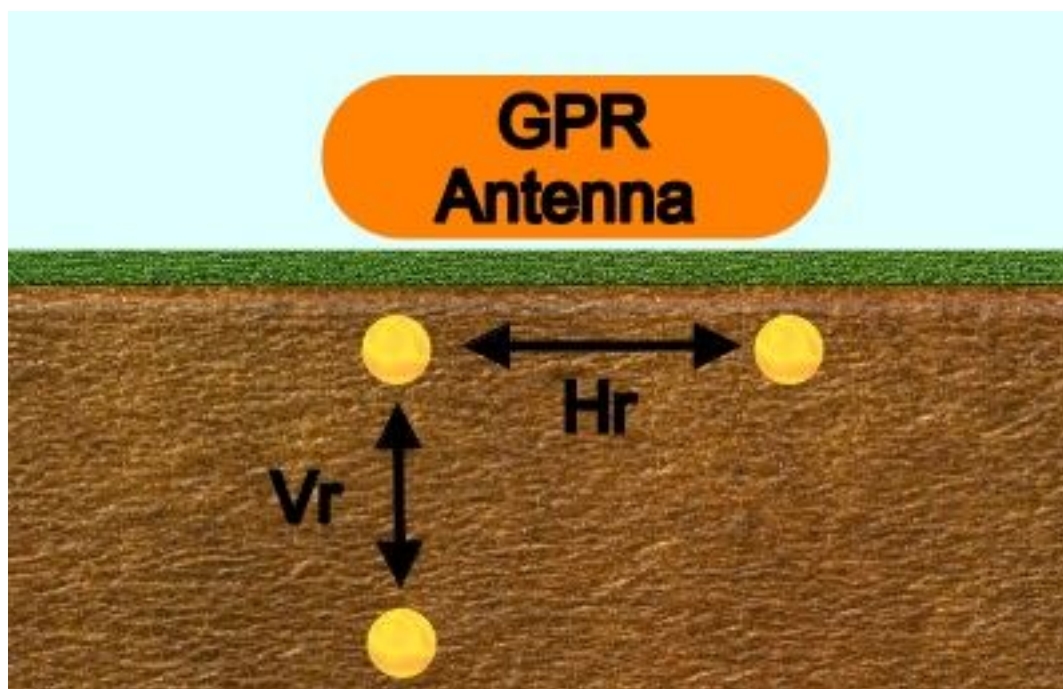


Рис. 1 Схема вертикального и горизонтального разрешения, золотые точки это объекты.

Теперь, когда мы знаем что такое вертикальное и горизонтальное разрешение, мы можем получить их из таблицы данных антенны, которую поставяет производитель, не так ли? Извините, но нет. Производители антенны будут более чем счастливы, дать Вам много рекламы, брошюр и едва ли не образцы данных из учебников геофизики, но ничего больше. Хотя есть одна вещь, которую мы можем получить едва ли не от каждого производителя антенн на рынке, это центральная частота антенны. Только помните, что различные производители указывают этот параметр по-разному. Гораздо лучшим подходом, было бы спросить какова длительность передаваемого импульса? Это позволит Вам сделать Ваши собственные заключения о центральной частоте таким способом, с которым Вы хорошо знакомы.

Теорема взаимности утверждает, что приемная антенна также хорошо работает на прием, как и на передачу, если все физические и технологические параметры сохраняются идентичными. Таким образом, все что передано, теоретически можно получить обратно с помощью подобного устройства. Принимая во внимание, что грунт работает как низкочастотный фильтр, мы можем с уверенностью утверждать, что то, что не было передано, безусловно, не имеет шанса быть переданным, если оно имеет частоту выше, чем существующая в частотном спектре исходного сигнала. Единственным исключением из этого правила является то, что если Вы используете полностью защищенную антенну, и источником сигнала является внешний источник. Это очень важно, потому что я лично читал об антеннах, которые удивительным образом воспринимают частоты с длительностью импульса от 3 до 4 нс. Как это произошло, к сожалению, никогда мне не объяснялось, но я опубликую это, как только узнаю все факты.



Почему так важен передаваемый импульсный сигнал или центральная частота? Это происходит, потому что вертикальное разрешение не что иное, как половина длительности передаваемого импульсного сигнала во времени. Если мы переведем это в информацию о глубине, то мы можем сказать, что вертикальное разрешение это половина ширины вектора скорости передаваемого импульсного сигнала в среде:

$$V_r = \frac{T_{pulse} \cdot c}{2 \cdot \sqrt{RDP}} \quad (1)$$

где:

V_r - вертикальное разрешение

T_{pulse} - длительность передаваемого импульсного сигнала, она может быть рассчитана путем использования инверсии основной и центральной частоты

c - скорость света в вакууме

RDP - относительная диэлектрическая проницаемость среды

Пожалуйста, имейте в виду, что это является приближенной формулой, которая работает большую часть времени, но не всегда. Причиной этого является то, что передаваемый импульсный сигнал будет страдать от низкочастотной фильтрации в среде, через которую он проходит. Распространяющиеся потери сигнала также влияют на вышеописанную формулу. Это означает, что объекты, которые находятся далеко от поверхности, скорее всего, будут иметь различное вертикальное разрешение, чем те которые ближе к источнику зондирующего импульса.

Другим важным фактором для рассмотрения является то, когда пытаются оценить вертикальное разрешение материалов двух близких объектов. Материалы, которые создают сильное отражение, по всей вероятности скрывают объекты, которые находятся рядом с ними, в то время как материалы, которые создают слабые отражения будет легче обнаружить из-за более частичного отражения. Последнее заключение будет конечно верно, если слабые отражения будут достаточно сильными, чтобы быть гарантированными, иначе Вы можете их полностью потерять.

Наиболее важным аспектом о вертикальном разрешении является то, что слишком высокое разрешение является не очень хорошей практикой. Наиболее консервативный подход съемки вдвое лучше, чем расчётное значение, определит исследование в лучший вид. Уровень знаний человека об интерпретации данных исследования будет также без всяких сомнений играть важную роль в этом деле. GPR исследования, в большинстве случаев, не терпят неудачу. Они просто не выполняют обязательства и ожидания клиентов. Использование всех знаний теории, которые нам предоставляют и развитие рассудительности является ключом к успеху.

Теперь второй тип разрешения - горизонтальное разрешение. Это тема многочисленных споров и многие люди имеют свое собственное мнение о том, каким должен быть правильный способ расчета горизонтального разрешения. В принципе можно обобщить и сказать, что горизонтальное разрешение зависит от следующих параметров:

1. Количество следов на единицу расстояния. Если у Вас есть 10 следов на метр, то шансов различить объекты на расстоянии 50 мм друг от друга нет. На самом деле я был бы очень удивлен, если бы мы действительно могли различить объекты, которые располагаются 100 мм друг от друга.
2. Ширина луча антенны. Этот параметр почти никогда не указан в таблице данных антенн, и многие люди используют приближения для



значения. Очевидно, что уже ширина луча антенны, тем выше горизонтальное разрешение.

3. Дистанция между передающей и приемной антенной. Это то, на что большую часть времени не обращают внимания, но если иметь две антенны ближе к друг другу, скорее всего, это увеличит вероятность реализации обеих антенн, находящихся одинаково под влиянием внешних факторов.
4. Глубина, на которой располагаются объекты, которые нам необходимо различить. Независимо от типа используемой антенны ширина луча антенны уже ближе к поверхности, и следовательно разрешение второго вышеупомянутого параметра, выше.

Как отмечалось ранее, существует много различных критериев для горизонтального разрешения и хотя это намного более понятный метод, есть много факторов, влияющих на него, и тем самым дающие основания для столь многих споров. Я лично не смотря на это, обнаружил, что следующая формула дает лучшие результаты в реальных условиях:

$$Hr = \frac{c}{4 \cdot f \cdot \sqrt{RDP}} + \frac{D}{\sqrt{RDP + 1}} \quad (2)$$

где:

Hr - горизонтальное разрешение

c - скорость света в вакууме

f - центральная частота антенны

RDP - относительная диэлектрическая проницаемость

D - глубина плоскости, где расположены два объекта

Как и в случае с вертикальным разрешением, эта формула отнюдь не является точной все время и за счет всех факторов, влияющих на горизонтальное разрешение, даст только хорошее представление о том, чего ожидать. При планировании исследования, хорошей идеей является обратиться к результатам, полученные с помощью данной формулы с большими оговорками.

Несколько примеров

Было бы неразумно разместить все эти формулы вместе и не сделать ни одного эксперимента чтобы доказать их справедливость, или по крайней мере применимость. Эксперименты являются простыми и если у Вас есть управляющее устройство георадара и СВЧ-антенна Вы сможете повторить их без всяких проблем.

Для вертикального разрешения я решил провести два различных эксперимента. Первый с использованием двух плоских отражателей, а второй с использованием двух цилиндрических отражателей для получения гипербола.

Для горизонтального разрешения, два плоских отражателя которые я использовал, были металлическая пластина толщиной 1,6 мм и органическое стекло толщиной 10 мм. Обе пластины были, по крайней мере, в два раза крупнее антенны во всех направлениях. Я использовал стироловые пенопласты в 50 мм для создания



разделения между двумя слоями. Это дало мне действительно легкую настройку и позволило мне быстро и успешно изменить условия. Схема настройки представлена на рисунке 2.

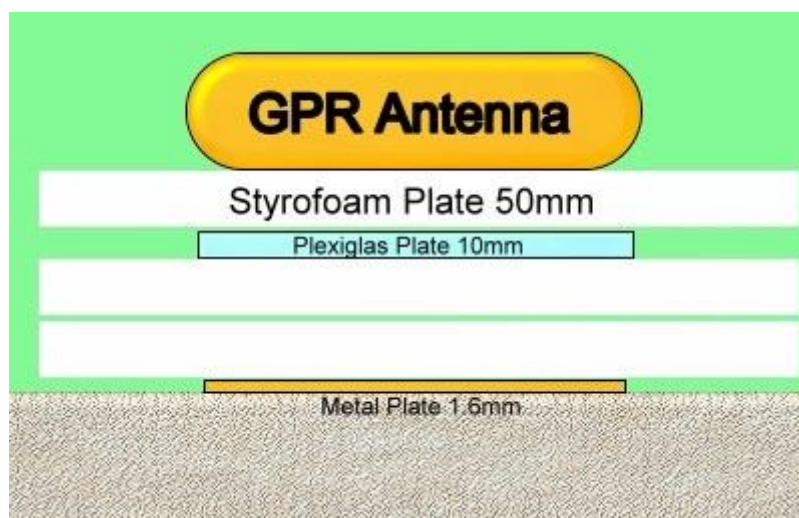


Рис. 2 Настройка эксперимента для вертикального разрешения в слоях.

Я собрал ряд файлов данных, первый только с одной металлической пластиной 150 мм от антенны. Второй файл был записан с органическим стеклом 100 мм от металлической пластины и последний с органическим стеклом, отдаленным от металлической пластины только на 50 мм. Я использовал антенну с центральной частотой 1300 МГц, которая в данной установке теоретически будет давать разрешение 116 мм. Как Вы можете видеть на Рисунке 3, результаты несколько лучше, чем расчетное разрешение для этой антенны. Две пластины все еще видимы при отдалении всего 50 мм друг от друга. Конечно, можно утверждать, что в действительности данные можно было бы легко пропустить и я конечно согласен с этим. Это является причиной, почему ожидание разрешения в 100 мм является лучшим подходом.

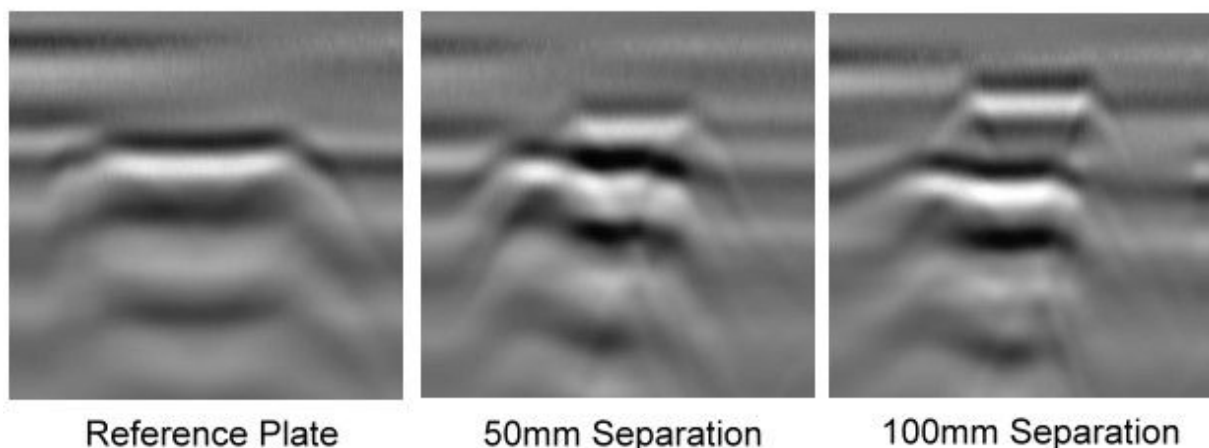


Рис. 3 Результаты экспериментов для слоев настройки.

Было бы это также, если бы два отражателя были цилиндрической формы и металлические как арматурные стержни в бетонной плите? Скорее всего, трудности интерпретации по сравнению с предыдущим примером увеличатся.



Настройка для труб практически идентична с настройками для слоев, кроме того теперь я использовал стальные трубы 10 мм вместо пластин. Схема отображающая настройку представлена на Рисунке 4.

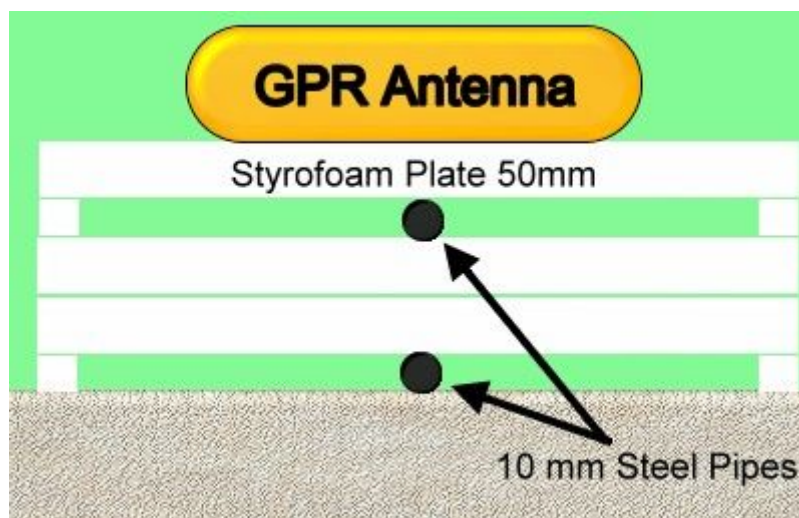


Рис. 4 Настройка для эксперимента с использованием вертикально расположенных труб

Результаты являются гораздо более трудными для интерпретации и разделение на 50 мм почти невозможно, чтобы идентифицировать второй объект, если у Вас нет соответствующих знаний о том, что расположено ниже. Рисунок 5 показывает, что даже на расстоянии 100 мм, сильное отражение, вызванное первой трубой, делает его очень сложным для нахождения второй. Многие опытные пользователи GPR могут спорить со мной, что они заметят вторую трубу на 50 мм, без каких-либо проблем. Это связано с тем, что две резко-положительные, в данном случае черные, гиперболы будут прекрасно попадать в точки, во время переноса, которое к ним применяется. Это может быть или не может, я бы лично предпочел использовать высокочастотную антенну и разъединить их.

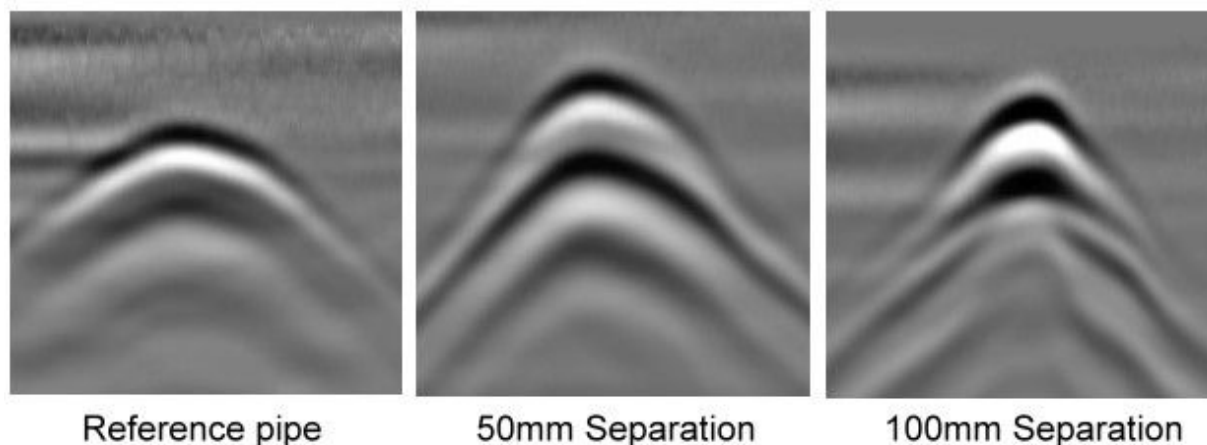


Рис. 5 Результаты эксперимента для вертикального разрешения двух труб



Для эксперимента горизонтального разрешения я использовал несколько 20 мм труб, но я расположил их в одной плоскости, параллельно поверхности. Расстояние от антенны до трубы было уменьшено до 85 мм, а горизонтальное расстояние между трубами было изменено с 250 мм до 100 мм и 50 мм для ближайшей дистанции.

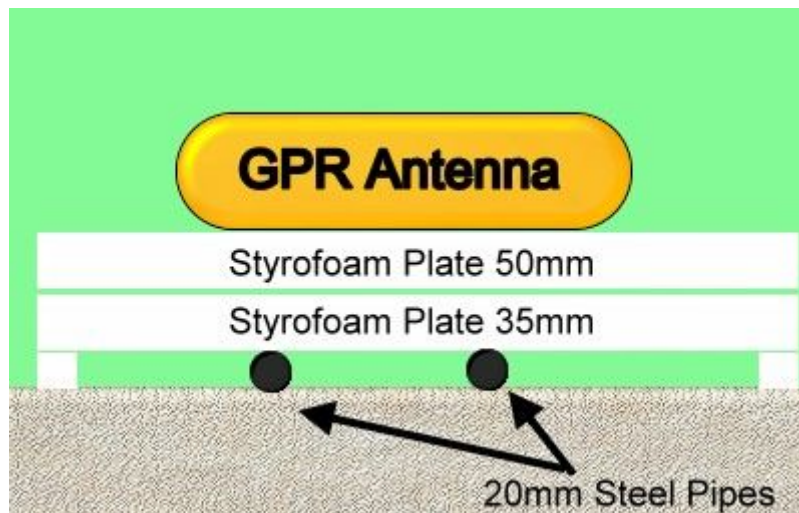
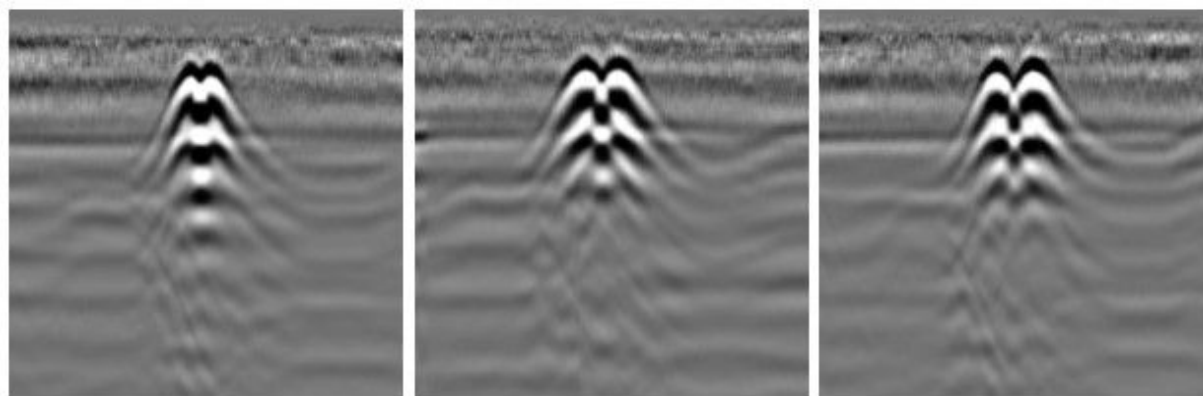


Рис. 6 Настройка для эксперимента горизонтального разрешения

Простая формула, которая была описана выше для горизонтального разрешения, дает расчет горизонтального разрешения равного 117 мм. Этот расчет кажется слишком высоким, если Вы посмотрите на Рисунок 7, где отображены результаты эксперимента.



100mm hor. separation 200mm hor. separation 250mm hor. separation

Рис. 7 Результаты эксперимента для горизонтального разрешения

Похоже, что разрешение весьма выше, на самом деле можно было бы легко сказать, что дистанция 100 мм вполне подходит. Оно приблизительно на 15% лучше, чем расчет, но необходимо учитывать все факторы, влияющие на исход эксперимента. В реальных условиях, исследование относительной диэлектрической проницаемости не будет даже близко к постоянной величине, ничто не излучает частоту одной спектральной линией. И следовательно факт, что предполагаемое горизонтальное разрешение, представленное в формуле номер 2, является только хорошей отправной точкой для определения целесообразности исследования.



Заключение

Возвращаясь к вопросу, с которого мы начали наше обсуждение: *сколько антенн у меня должно быть? Ответ будет очень простым, столько, сколько различных исследовательских работ необходимо провести.*

Это не является моим намерением еще больше запутать тех, кто ознакомился с данным материалом. Данные заключения основаны на том, что я прочитал в литературе, перечисленной в разделе источников и на моем личном опыте. Я считаю, что это хорошая практика анализировать все факторы, которые оказывают влияние на исход исследования, прежде чем вселить слишком большие надежды в людей, которые доверились данной технологии. Иногда это может слишком большая ответственность и нехватка фактов, которые испортят результаты исследования.

Я оставляю Вас в отправной точке, чтобы Вы могли сделать свои собственные заключения и проделать немного экспериментов, чтобы выяснить, что лучше всего подходит для Вашей определённой линии исследований.

Все данные, использованные в данной статье, были собраны с помощью управляющего устройства SIR-3000 компании GSSI, США и нашей собственной антенны GCB-1500. Данные были обработаны с помощью нашего программного обеспечения GPRSoft PRO, а документы подготовлены с использованием OpenOffice writer.

Если у Вас возникнут вопросы или предложения, пожалуйста пишите нам на электронный адрес mail@geoscanners.com с пометкой в теме сообщения "Разрешение GPR антенны".

Я отвечу на все Ваши письма.

Источники:

1. *S.G.Millard, A.Shaari, J.H.Bungey, 2002, Resolution of GPR bowtie antennas. Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2002.*
2. *Lawrence B. Conyers, Ground-Penetrating Radar for Archaeology, Altamira Press ISBN 0-7591-0772-6*
3. *John M. Reynolds, An introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley and Sons, ISBN 0-471-96802-1*
4. *Harry M. Jol, Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Elsevier, ISBN 978-0-444-53348-7*