

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.9>

УДК 537.874, 550.837.76, 550.8.05

О БЕСПРОВОДНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЕМНИКА И ПЕРЕДАТЧИКА ГЕОРАДАРА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГОДОГРАФА

О. А. Гулевич, Л. Б. Волкомирская, А. Е. Резников

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.

Пушкова РАН (ИЗМИРАН), 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское ш. д.4

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2020 г.

Аннотация. Обработка полевых данных годографа моноимпульсного георадара с беспроводной синхронизацией аналогична обработке, применяемой в методе отраженных волн сейсморазведки, но имеет определенные особенности. В работе впервые описывается эффект появления ступеней в картине регистрируемого видеосигнала при разносе приемного и передающего блоков георадара на примере работ в горных выработках месторождения калийных солей. Применение кинематической поправки в георадиолокации с учетом влияния синхронизации по электромагнитной волне особенно актуально для глубинных исследований с большим разносом антенных блоков.

Ключевые слова: бистатический георадар, беспроводная синхронизация, годограф, видеоимпульс.

Abstract. The processing of the hodograph data of a monopulse georadar with wireless synchronization is similar to the method of reflected waves in seismic prospecting but has particular differences. The paper describes for the first time the effect of the appearance of steps in the image of the recorded video signal when the receiving and transmitting units of the georadar are moving apart on the example of studies in the mine workings of a potassium salt deposit. Using a kinematic correction in GPR in consideration with the effect of synchronization via electromagnetic wave is especially important for deep research with a large spacing of antenna units.

Key words: bistatic georadar, wireless synchronization, hodograph, video pulse.

Введение

Одной из основных причин построения беспроводного способа синхронизации в георадарах с бистатической схемой расположения приемного и передающего антенного блока являлось снижение помех [1]. Кроме того, такой способ синхронизации позволяет произвольно менять расстояние между антенными блоками, что является дополнительной возможностью настройки аппаратуры в условиях полевых работ.

Помимо традиционного профилирования, то есть сканирования по профилю с неизменной конфигурацией аппаратуры, в георадиолокации для сбора данных о скоростных характеристиках среды строят годограф – функцию зависимости времени прихода отраженного сигнала от расстояния между приемной и излучающей антеннами. Данные годографа позволяют вычислить усредненную диэлектрическую проницаемость выделенных структур геoeлектрического разреза, характерную для текущих параметров съемки и среды, что довольно часто используется на практике, например, [2].

Картина годографа, получаемого при разносе приемного и передающего блоков георадара, визуально аналогична сейсмограмме в методе отраженных волн сейсморазведки [3,4], причем в обоих волновых методах несмотря на разную природу волн применяются схожие алгоритмы обработки данных, например, учет кинематической поправки.

Однако при беспроводном способе синхронизации в георадиолокации иногда наблюдаются эффекты сдвига участков радарограмм по шкале временной задержки при увеличении расстояния между приемным и передающим блоком антенн. Особенно данная проблема актуальна для глубинной георадиолокации, когда глубина исследования и разнос антенных блоков составляет десятки-сотни метров.

При рассмотрении схемы построения годографа георадара ситуация еще осложняется тем, что амплитуда и волновая форма импульса зависят от направления, то есть на результат влияет пространственно-временная диаграмма излучения.

Вычисление диаграммы излучения в подповерхностной среде, в том числе поверхностной волны, требует применения довольно сложных численных и асимптотических методов [5,6]. Численное моделирование распространения поверхностной волны [7,8] на любом расстоянии от излучателя показывает, что при увеличении расстояния между приемником и передатчиком происходит расщепление поверхностной волны на волны, двигающиеся со скоростями, соответствующими воздуху и среде.

Применение метода георадиолокации в шахтах связано с решением прикладных задач по предупреждению затопления горных выработок и сокращению потери руды в целиках, причем метод показал высокую точность в соляных шахтах [9].

В данной работе на примере георадарных исследований в соляной шахте мы рассмотрим особенности в картине годографов, полученных с помощью моноимпульсных георадаров ГРОТ 12 с беспроводной синхронизацией, наблюдаемые при значительном увеличении разноса приемного и передающего антенных блоков.

1. Методика и аппаратура

Работы проводились в подземных горных выработках Старобинского месторождения калийных солей, Республика Беларусь. Петрофизические свойства пород соленосной толщи участка слабо дифференцированы по своей массе. Особенностью работ является горизонтальное направление сканирования: георадар перемещается по стенке главного юго-западного разведочного транспортного штрека №1 третьего калийного горизонта (рис. 1). При подобном горизонтальном сканировании исследуемый разрез является более однородным по сравнению с обычным вертикальным сканированием с поверхности, когда зондирующий сигнал проходит через толщу слоев с разными характеристиками.

Работы проводились моноимпульсным георадаром ГРОТ 12 (импульсная мощность передатчика 1 МВт, частотный диапазон от 50 до 1500 МГц, длина импульса 1 нс, вес 3 кг) с антеннами 1 метр (центральная частота 100 МГц).

Были выполнены симметричный годограф с общей средней точкой (далее – «годограф ОСТ»), годограф с общим пунктом приема (далее – «годограф ОПШ») и профилирование с неизменным разносом между приемным и передающим антенными блоками.



Рис. 1. Георадарное сканирование по стенке шахты.

Штреки третьего калийного горизонта диаметром 3 метра расположены на расстоянии 15 метров (рис. 2). Начальная конфигурация аппаратуры в годографе ОСТ: центр на отметке 60 м., разнос между приемником и передатчиком 2 м, центр годографа ОСТ расположен на расстоянии 60 м от острого угла верхней выработки.

Порядок измерений годографа ОСТ следующий: 11 первых записей сделаны с накоплением в начальной точке (без изменения конфигурации) с расстоянием между приемником и передатчиком 2 м далее выполнили измерения с шагом 0,5 м (блоки приемника и передатчика разносились симметрично от ОСТ на 0,25 м каждый); максимальный разнос между приемным и передающим блоком – 47 м.

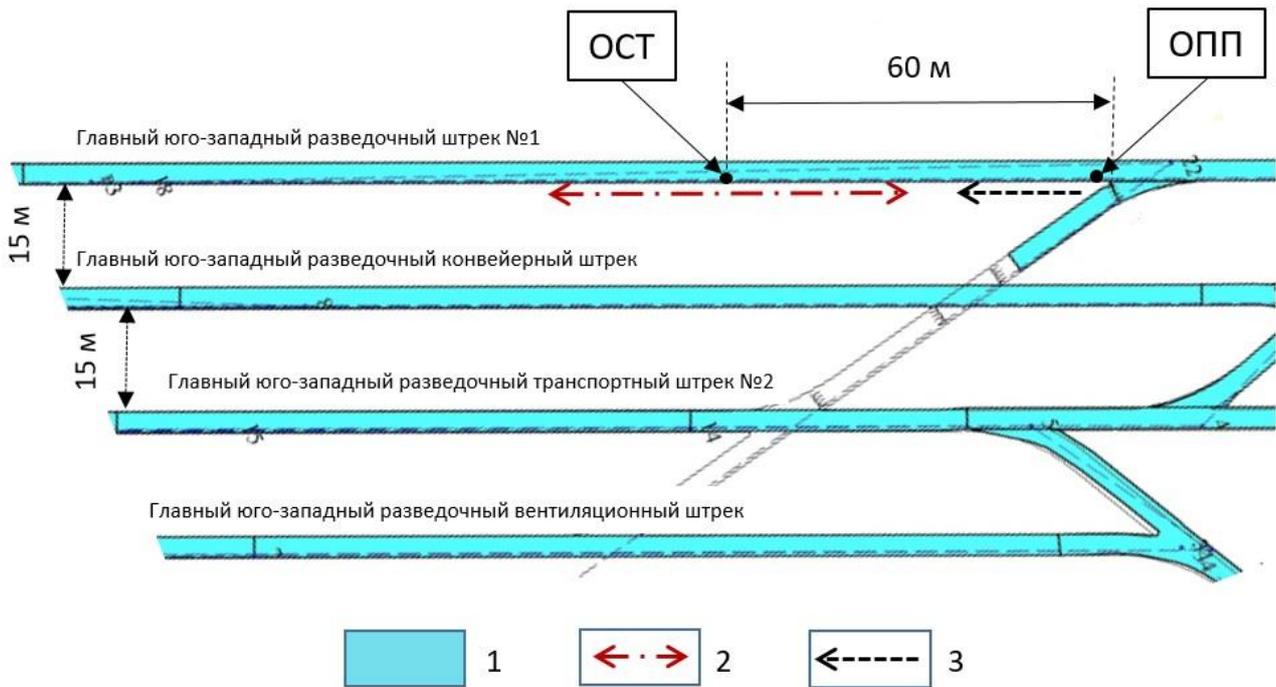


Рис. 2. Схема построения годографов ОСТ (полевой №071019004) и ОПП (полевой № 101019004) на участке подземных горных выработок (вид сверху)
 1 – штреки третьего калийного горизонта диаметром 3 м; 2 – направление перемещения антенных блоков годографа ОСТ, 3 – направление перемещения блока передатчика от приемника в годографе ОПП и направление профилирования (полевой №101019005).

Годограф ОПП выполнялся с такой же комплектацией аппаратуры ближе к острому углу верхней выработки (рис. 2). Начальная конфигурация аппаратуры: блок приемника находится на расстоянии 1 м от угла, блок передатчика находится на расстоянии 3 м от угла, разнос между антенными блоками 2 м.

При измерениях годографа ОПП было выполнено накопление из 10 первых регистраций волновых форм при начальной конфигурации, далее выполнялся несимметричный годограф с шагом 0,5 м (блок приемника неподвижен, блок передатчика перемещался вдоль стены выработки от блока приемника с шагом 0,5 м).

На этом же профиле ОПП (рис. 2) было выполнено профилирование (полевой №101019005): начальная конфигурация приборов такая же, как при

выполнении годографа ОПП, затем одновременно блок передатчика и блок приемника с шагом 0,5 м. перемещались от угла по стене выработки.

2. Результаты

На горизонтальной оси радарограммы (рис. 3) отложено расстояние по профилю годографа (измерения в режиме накопления в начальном положении разноса аппаратуры занимают отрезок от 0 до 5,5 м профиля годографа ОСТ), правая вертикальная шкала является шкалой временных задержек сигнала в наносекундах, слева по вертикали – шкала глубин, полученная при пересчете временных задержек с усредненным значением скорости сигнала.

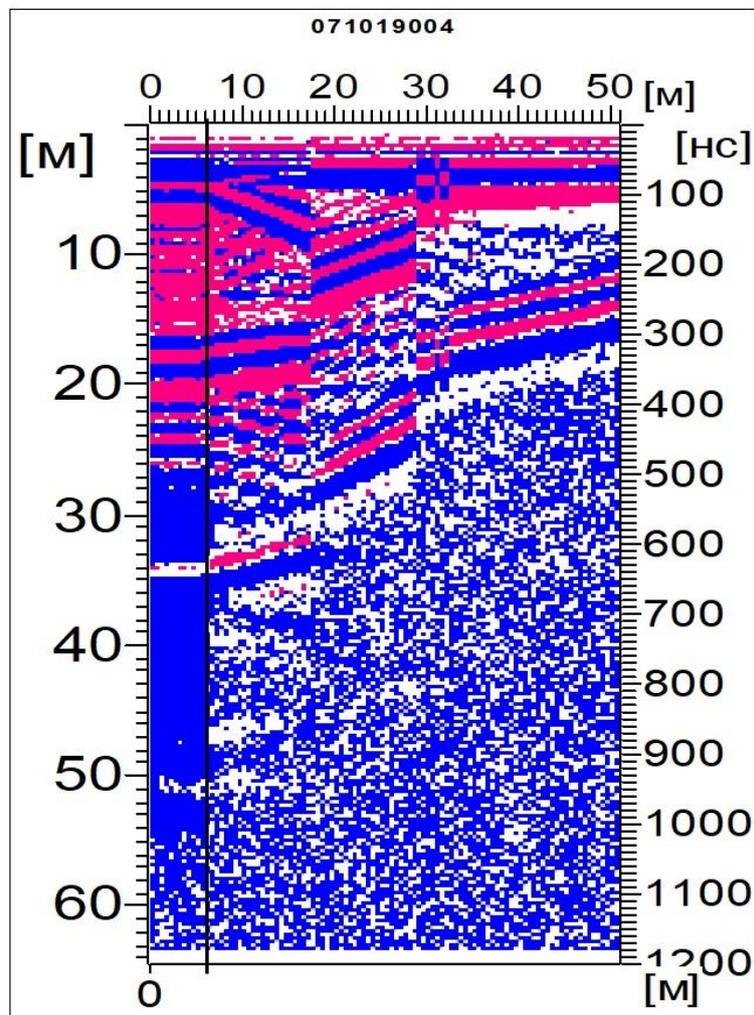


Рис. 3. Радарограмма годографа ОСТ в мин-макс представлении.

Положение «0» по профилю соответствует первоначальному разносу между приемным и передающим блоками в 2 метра; черной вертикальной линией обозначено последнее измерение в начальном положении (11 измерение).

На радарограмме годографа ОСТ (рис. 3) отчетливо видны радиообразы пустотных выработок на расстоянии 15 метров и 33 метра по шкале глубин, положения границ которых смещаются по мере увеличения разноса антенных блоков. Причем, области измерений по профилю разбиваются на характерные сегменты со скачкообразным смещением волновых форм вверх по шкале временных задержек. Например, на радарограмме (рис. 3) видно, что при разносе приемника и передатчика на расстояние 12м (положение 17 м по профилю) происходит смещение временных задержек до границ выработок. Также смещение видно на расстоянии 26 м (положение 31 м по профилю). На участке до смещения картина радиообразов соответствует общепринятым представлениям в георадиолокации, основанным на модельных расчетах.

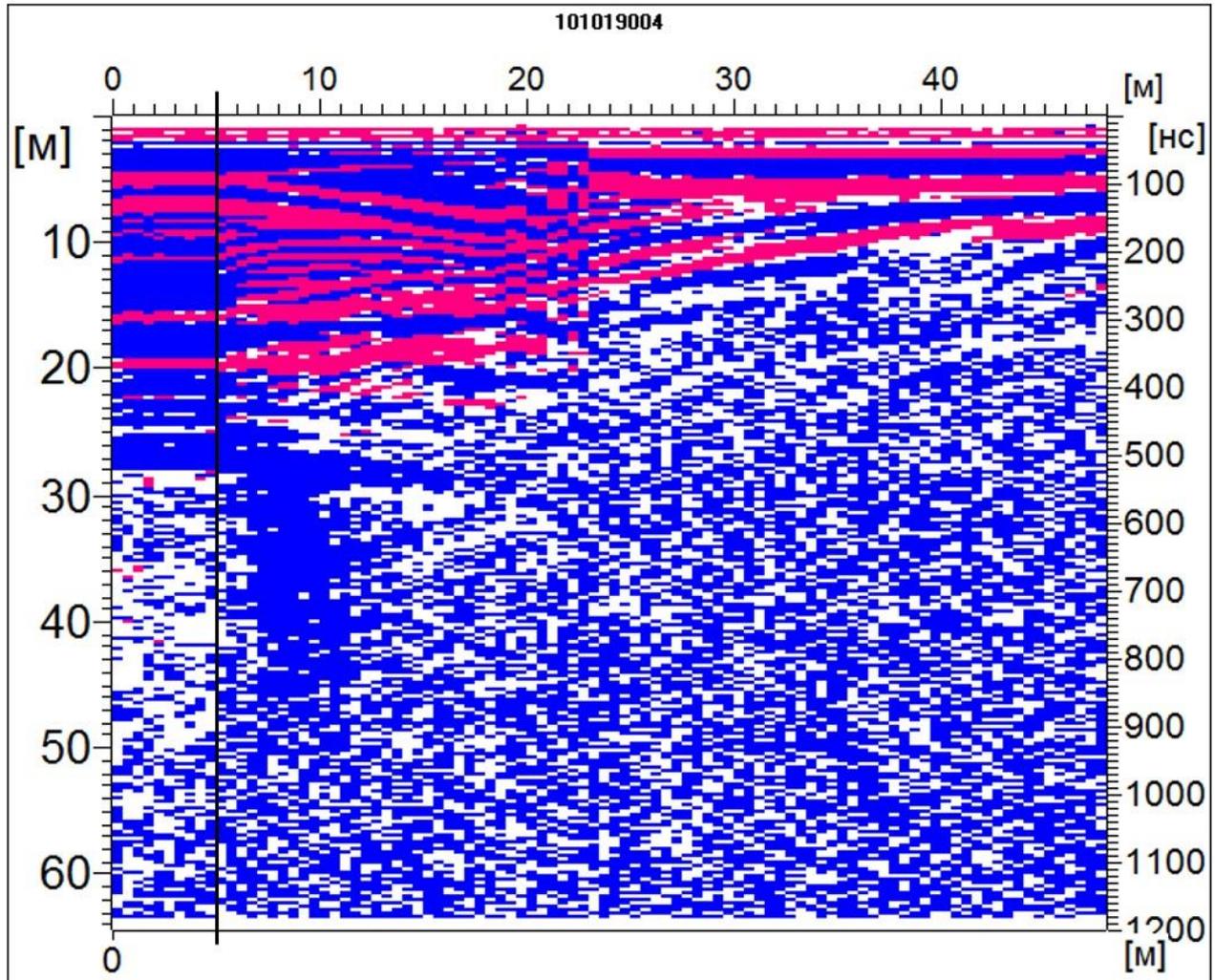


Рис. 4. Радарограмма годографа ОПП (полевой № 101019004)
Положение «0» по профилю соответствует первоначальному разносу между приемным и передающим блоками в 2 метра; черной вертикальной линией обозначено последнее измерение в начальном положении (10 измерение).

Участки с характерными сдвигами по шкале глубин наблюдались также при выполнении несимметричного годографа ОПП (рис. 4). На рис. 5 виден участок нестабильной синхронизации с 21 по 23 м по профилю, который разделяет радарограмму на две области, со сдвигом по вертикали. Таким образом, на профиле ОПП смещение картины радиообразов происходит при разnose между антенными блоками на расстояние более 18 м.

Радарограмма того же профиля, выполненного традиционным методом профилирования (рис. 5) показывает общий вид геоэлектрического разреза, на котором отчетливо видны границы удаляющихся отводов и выработок. Так как синхронизация георадара при профилировании стабильна и происходит по воздушной волне, никаких сдвигов волновых форм по глубине здесь не наблюдается.

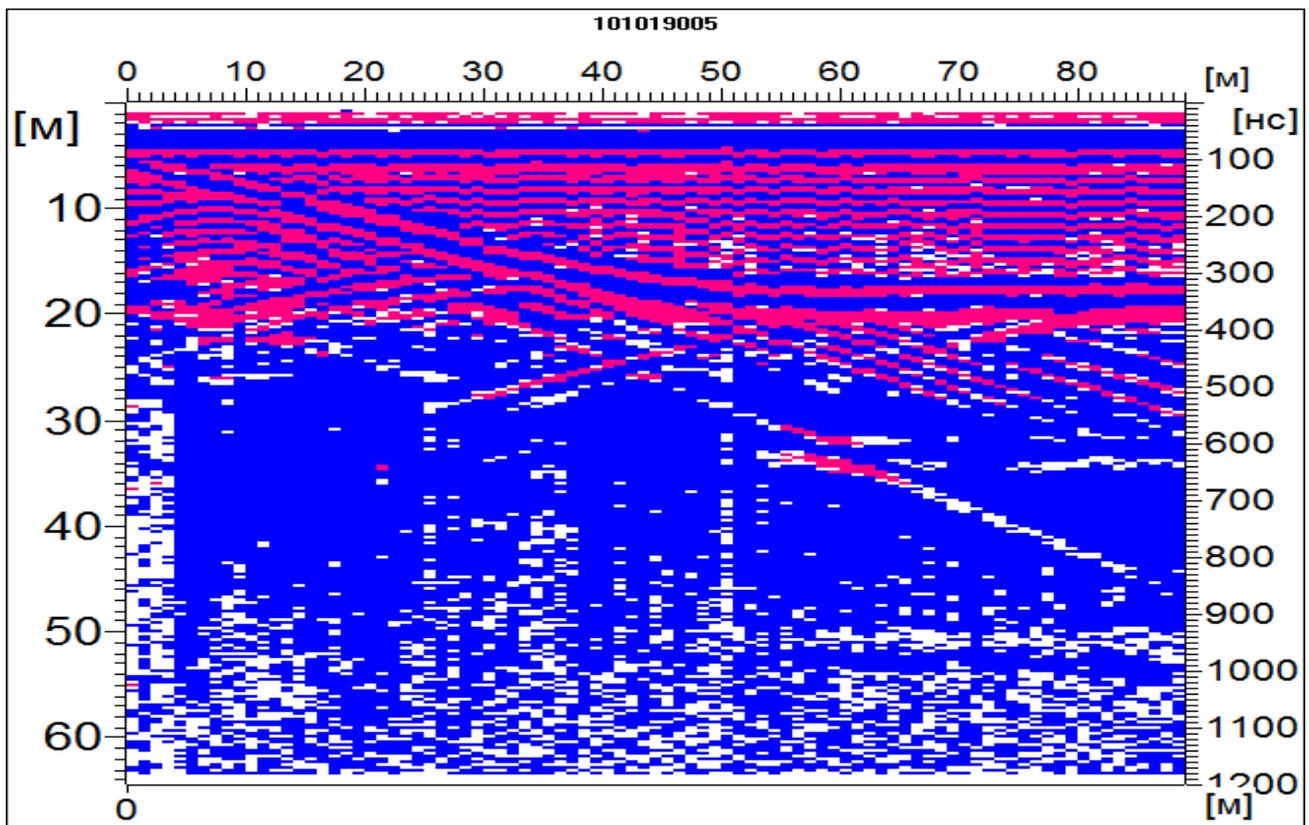


Рис. 5. Радарограмма профиля (полевой №101019005).

Наблюдения показывают, что эффект скачка синхронизации приемника и передатчика носят системный характер при увеличении разноса между антенными блоками.

3. Обсуждение результатов

Характерной особенностью наблюдаемых скачков со смещением областей регистрируемых сигналов при увеличении разноса аппаратуры является то, что они затрагивают всю область измерений, то есть вся часть разреза с характерными границами и осями синфазности смещается вверх.

Такой сдвиг регистрации можно объяснить тем, что в точках смещения происходит переключение синхронизации приемника и передатчика на более поздний запускающий измерения сигнал.

Действительно, без учета особенностей беспроводной синхронизации антенных блоков и в рамках представлений геометрической оптики для расчета параметров среды время задержки сигнала, отраженного от границы на глубине h , при разносе антенных блоков на расстояние d можно рассчитать по простой формуле:

$$t = 2 \frac{\sqrt{\varepsilon}}{c} \sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}}, \quad (1)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость, c - скорость электромагнитной волны (света) в вакууме. Формула (1) задает годограф для абсолютной синхронизации, когда приемник начинает отсчет времени сразу после излучения импульса. В случае, когда синхронизация осуществляется по воздушной волне от зондирующего импульса передатчика, начало регистрации отстает от времени излучения на $t' = d/c$.

$$t = 2 \frac{\sqrt{\varepsilon}}{c} \sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}} - \frac{d}{c} \quad (2)$$

Если функция классического годографа (1) всегда возрастает с увеличением d , то в георадарах с беспроводной синхронизацией при малых d время задержки всегда уменьшается, проходит минимум, и только потом начинает возрастать.

По двум измерениям задержек сигнала t_1 и t_2 на расстояниях между приемником и передатчиком d_1 и d_2 на основе уравнения годографа (2)

однозначно определяются мощность слоя h и его диэлектрическая проницаемость, данный расчет автоматизирован в программном обеспечении некоторых георадаров, например, георадаров серии ГРОТ 12.

Однако данная кинематическая поправка, учитывающая плавное изменение функции годографа с увеличением разноса антенных блоков, не объясняет скачкообразных переходов между областями радарограмм.

Следует отметить, что в георадарах серии ГРОТ 12 имеется такой параметр как порог синхронизации, который задает минимальное значение интенсивности запускающего сигнала, что необходимо для отсечки шумов. В случае, если интенсивность воздушной волны падает ниже порогового значения, синхронизация по ней невозможна. Причин этому может быть несколько: особенности рельефа местности съемки, слишком большое расстояние между антенными блоками (геометрическое расхождение), интерференция собственных компонент импульса [10] или интерференция с преломленными, отраженными сигналами.

Рассмотрим поведение поверхностной волны при больших разносах аппаратуры. В [7,8] показано, что поверхностная волна является суммой двух волн, распространяющихся со скоростями, равными скоростям волн в каждой из разделяемых поверхностью сред.

На рис. 6 представлены этапы формирования поверхностной волны для первых двух гармоник тока (значению $u = 5.0$ нс соответствует расстояние между антенными блоками 1,5 м). Изображена зависимость электрического поля поверхностной волны от расстояния между передатчиком и приемником для двух разных профилей тока в антенне передатчика. Заданное значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_0 соответствует дистиллированной воде. Видно, как происходит расщепление поверхностной волны на волны, двигающиеся со скоростями, соответствующими воздуху и воде.

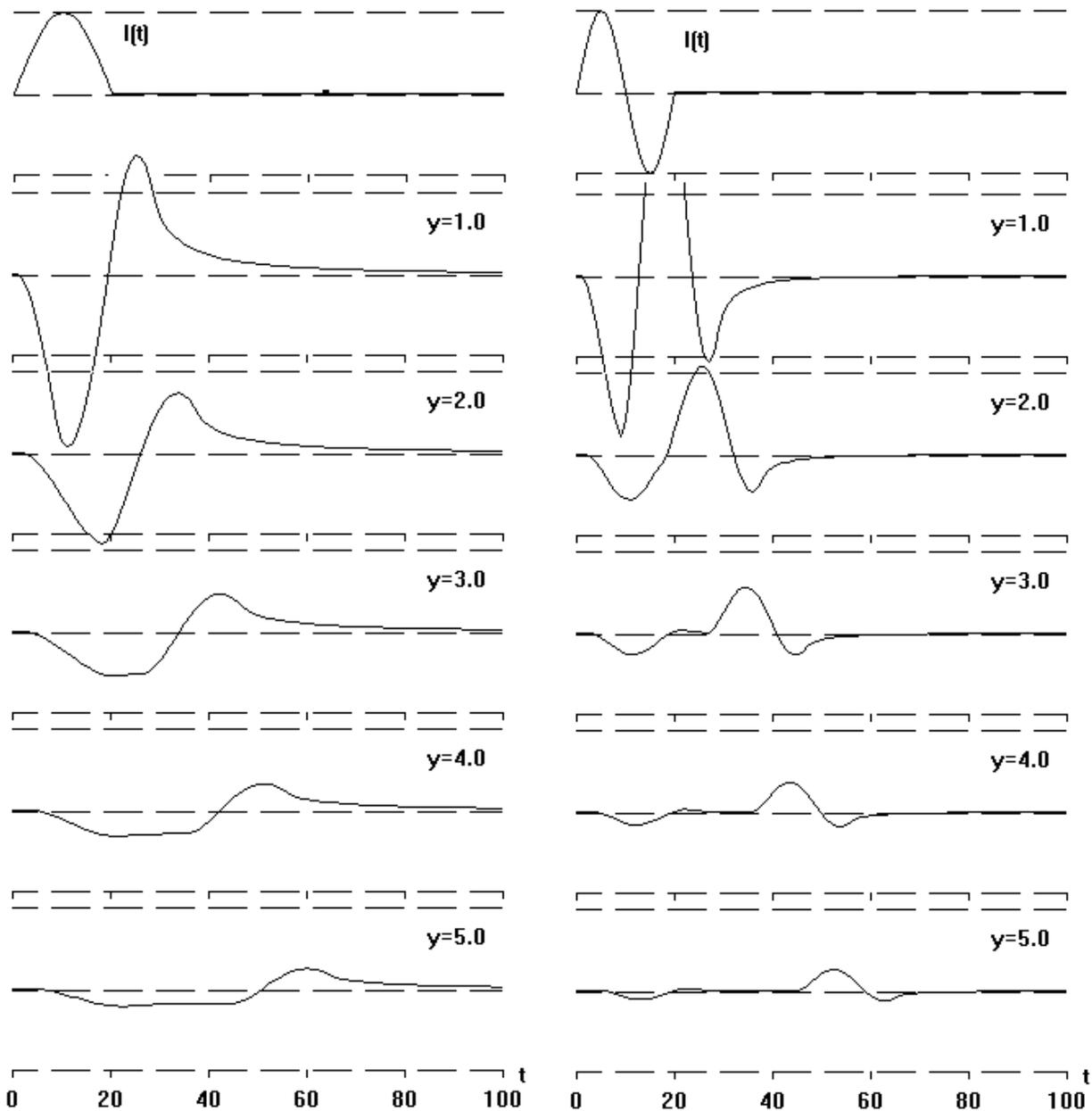


Рис. 6. Численное моделирование зависимости поля в поверхностной волне от расстояния между антеннами ($\epsilon_0 = 81$)

Таким образом, при выполнении годографа может оказаться, что синхронизация по наиболее быстрой воздушной волне вследствие установленного порога переходит к синхронизации по волне, распространяющейся в приповерхностной среде. В этом случае кинематическая поправка должна включать информацию о среде, то есть $t' = d\sqrt{\epsilon}/c$, и формула (2) преобразуется:

$$t = 2 \frac{\sqrt{\epsilon}}{c} \sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}} - \frac{d\sqrt{\epsilon}}{c} \quad (3)$$

В нашем эксперименте, на примере годографа ОСТ, первое смещение волновых форм при разносе приемника и передатчика на расстояние 12 м соответствует разности между формулами (3) и (2), то есть пропорционально $(\sqrt{\varepsilon} - 1)$.

При известном расстоянии между штреками диэлектрическую проницаемость можно рассчитать. Она также довольно точно определяется по годографу до первого скачка и может быть выполнена, в том числе, автоматически в окне программе «Годограф» программного обеспечения ГРОТ 12. В нашем эксперименте расчетное значение диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя, найденное по годографу отражений от первого штрека, $\varepsilon = 7,7$. По скачку синхронизации, который свидетельствует о переходе на синхронизацию по волне, распространяющейся в приповерхностном слое, можно также рассчитать диэлектрическую проницаемость нижележащих слоев с учетом выражения (3) для участка от первого скачка до следующего.

Таким образом, данный эффект позволяет дополнительно количественно уточнить скоростные характеристики слоев разреза и ввести релевантные кинематические поправки.

Мы видим, что при разносе аппаратуры большое значение приобретают электрофизические характеристики приповерхностного слоя разреза, определяющие скорость распространения сигнала по направлениям, то есть пространственно-временную диаграмму направленности. В случае, если имеется нижележащий слой с более высокими скоростными характеристиками электромагнитных волн, то на определенных расстояниях запуск синхронизации может переключаться на преломленные волны с более глубоких слоев разреза, которые пришли согласно принципу Ферма на регистратор быстрее и превысили порог синхронизации. Такая задержка синхронизации, в свою очередь, вызывает соразмерное уменьшение значений временных задержек регистрируемого полезного отраженного импульса.

В общем случае влияние на график годографа оказывают неоднородности структуры разреза, нарушения горизонтальной слоистости и анизотропный характер распределения электрофизических характеристик. Поэтому рассмотренные примеры в шахтах, с известной относительно однородной средой и геометрией структуры выработок, показывают эффекты синхронизации в виде, наиболее близком к модельному, насколько это возможно в реальных средах.

Выводы

В натурных исследованиях методом георадиолокации с беспроводной синхронизацией необходимо учитывать эффекты перехода синхронизации при увеличении расстояния между приемным и передающим антенными блоками.

Эффекты, связанные с беспроводной синхронизацией, могут быть менее или более выражены в зависимости от электрофизических характеристик исследуемой среды и других условий исследований (влияние помех, рельефа местности и т.д.).

Данные скачков кривой годографа, вызванных скачком синхронизации, можно использовать для получения информации о скоростных параметрах подстилающих пород.

Участки кривой годографа с общим типом синхронизации, характеризующиеся плавными линиями синфазности, подходят для дальнейшего анализа данных при применении кинематической поправки с учетом задержки синхронизации.

Применение адекватных кинематических поправок особенно актуально для глубинных исследований методом георадиолокации с разносом антенных блоков на десятки и сотни метров.

Литература

1. Xia Z., Zhang Q., Ye S., Xu Z., Chen J., Fang G., Yin H. Design of Wireless Automatic Synchronization for the Low-Frequency Coded Ground Penetrating Radar. // Journal of Electrical and Computer Engineering. 2015. Article ID 864153, 6 p. <https://doi.org/10.1155/2015/864153>

2. Едемский Д.Е., Попов А.В., Прокопович И.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В. Опыт георадиолокационного зондирования почвенно-пирокластического чехла юго-восточной части о. Матуа (Курильские острова). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. №4. Вып.40. С.69-81. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-4-40-69-81>
3. Степанов А.В. Обработка сейсмических данных: Учебно-методическое пособие к курсам повышения квалификации «Петрофизика и геофизика в нефтяной геологии». Казань: Казанский университет, 2013. 24 с.
4. Воскресенский Ю.Н. Построение сейсмических изображений. Учебное пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа, 2006. 116 с.
5. Engheta N., Papas C.H., Elachi C. Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source. // Applied physics B - Photophysics and Laser Chemistry. 1981. Vol.B 26.P.231-238.
6. Brekhovskikh, L. M. Waves in Layered Media. Academic Press Inc., New York. 2nd edition. 1980. 503 p.
7. Rudenchik E.A., Volkomirskaya L.B., Reznikov A.E., Bezrukova E.G. Analytical representation of the surface wave generated by an antenna at the interface between two homogeneous media. // Physics of Wave Phenomena. 2010. Vol.18, No.2. P.110–118.
8. Rudenchik E.A., Volkomirskaya L.B., Reznikov A.E. Array Current Reconstruction by SurfaceWave Measurements. Two-Dimensional Approximation. // Physics of Wave Phenomena. 2008. Vol.16. No.3. P.1-10.
9. Мусалев Д.Н., Прохоров Н.Н., Зейтц В.Э., Барбиков Д.В., Иванова Н.Н. Определение местоположения стволов геологоразведочных скважин на уровне продуктивных горизонтов Старобинского месторождения калийных солей. // Горный журнал. 2014. №2. URL: <http://www.rudmet.ru/journal/1285/article/21865/>
10. Гулевич О.А. О глубинности в георадиолокации с учетом явления интерференции. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.8>

Для цитирования:

Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Резников А.Е. О беспроводной синхронизации приемника и передатчика георадара при построении годографа. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.9>