

Современные методы аэроэлектроразведки

Е.В. Мойланен
ИПУ РАН, moilanen@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Подробно описаны особенности аэроэлектроразведочных методов. Приведена классификация аэроэлектроразведочных систем. Рассмотрены современные активные системы с частотным, импульсным и комбинированным возбуждением сигнала, а также пассивные системы. Показаны особенности, с которыми сталкиваются при разработке и эксплуатации аэроэлектроразведочных систем. Обсуждаются особенности обработки измеряемых на борту летательного аппарата сигналов, способы повышения чувствительности, мобильности, надежности систем. Приводятся результаты съемок. Показано, какие задачи аэроэлектроразведка на сегодня успешно решает.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, МПП, frequency domain, time-domain.

ВВЕДЕНИЕ

Первая аэроэлектроразведочная система возникла в середине прошлого столетия (рис. 1). За последующие годы было разработано огромное количество аэроэлектроразведочных комплексов, которые устанавливаются на фюзеляже или внешней подвеске летательного аппарата (Fountain, 1998; Sorensen et al., 2013; Kaufman et al., 2014; Smith, 2014; Legault, 2015; Sorensen, 2018).



Рисунок 1. Частотная система INCO во время съемки, 1950 г.

Системы классифицируются на активные, которые включают в себя передатчик и приемник, и пассивные, включающие только приемник (рис. 15). Вне зависимости от типа, все аэроэлектроразведочные системы измеряют переменную составляющую электромагнитного поля.

Наибольшее распространение получили индукционные датчики, измеряющие компоненты вектора переменного электромагнитного поля.

За последнее десятилетие уровень шумов измерителя значительно снизился (рис. 2).

ПАССИВНАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Пассивные электроразведочные системы измеряют гармонические составляющие компонент вектора переменного магнитного поля Земли и, в некоторых случаях, компоненты вектора переменного электрического поля. Источники электромагнитного поля могут быть как естественного происхождения: близкие или удаленные грозы, возмущения в ионосфере, вызванные солнечным излучением и т. п., так и техногенные — поле низкочастотных радиопередатчиков, применяемых для связи с морскими судами, в том числе подводными, на больших расстояниях (Palacky and West, 2008) (СДВР — сверхдлинноволновые радиостанции).

Пассивные системы с естественными источниками работают на достаточно низких частотах и имеют наибольшую глубинность исследований (рис. 3) (Lo and Kuzmin, 2008).

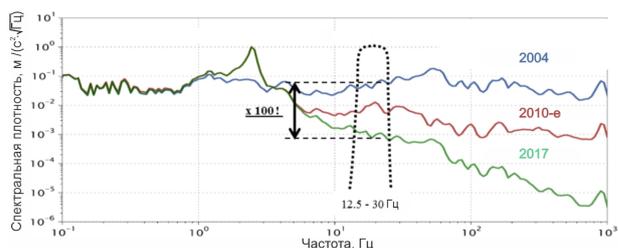


Рисунок 2. Спектральная плотность измерений шумов текущего и предыдущих поколений приемников (Sorensen, 2018).

Между активной и пассивной аэроэлектроразведкой находятся системы, источники возбуждения для которых специально располагаются на земле: аэроэлектроразведка методом длинного кабеля (БДК), методом незаземленной петли (НП) и методом заряда (Человечков и др., 2012).



Рисунок 3. Пассивная система AirMT (Prikhodko et al., 2020).

АКТИВНАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

В активной аэроэлектроразведке для создания зондирующего поля принято пользоваться либо непрерывным гармоническим, либо импульсным методом возбуждения. В первом случае сигнал представляет собой суперпозицию нескольких синусоидальных колебаний с фиксированными частотами, во втором – регулярную последовательность импульсов с паузой между ними. Соответственно принципы интерпретации сигналов, а вместе с ними и сами системы, разделяются на метод дипольного индукционного профилирования в аэроварианте, в англоязычной терминологии «Frequency-Domain» (FD) — частотные системы (рис. 4) и метод переходных процессов в аэроварианте, «Time-Domain» (TD) — временные системы (рис. 5).



Рисунок 4. Частотная система с жестким креплением передатчика относительно приемника Texas Gulf Sulphur, 1964 г.

В классической парадигме «Time-Domain» систем сигнал отклика следует за спадающим фронтом зондирующего импульса. Приемник непосредственно измеряет переходную характеристику геоэлектрического разреза при полном отсутствии влияния первичного поля.

Отклики от объектов различной проводимости разделяются по скорости спада напряжения на клеммах выводов приемных рамок. Кажущаяся простота интерпретации для «Time-Domain» систем и предопределила их популярность.



Рисунок 5. Активная система, реализующая аэрометод переходных процессов АМПП-2, 1970-е.

Мощные временные системы эффективно работают на обнаружение хорошего проводника в относительном изоляторе на больших глубинах даже в присутствии проводящего перекрывающего слоя (Kaufman, 1989). Верхняя часть разреза (ВЧР) в таком случае остается слабоизученной (рис. 6).

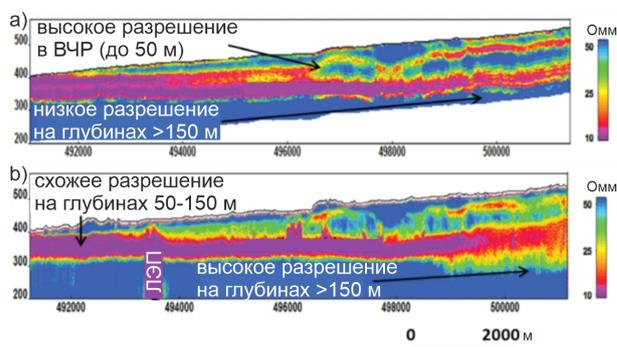


Рисунок 6. Псевдоразрезы кажущихся сопротивлений, построенные для (а) частотной системы и (б) временной системы, иллюстрирующие преимущества и недостатки каждого метода (Chen et al., 2014).

Частотные системы позволяют определять удельные сопротивления в значительно более широком диапазоне, чем time-domain данные (Hodges, 2013) (рис. 7, 8), что обеспечивается расширением частотного диапазона в сигнале возбуждения в область высоких частот. Благодаря этому можно выявить неоднородности в высокоомных областях и в приповерхностных слоях. Как следствие, при поисках слабо проводящих объектов гораздо эффективнее оказываются существенно менее

мощные, но более высокочастотные «Frequency-Domain» системы.



Рисунок 7. Частотная система с жестким креплением передатчика относительно приемника DIGHEM.

Вследствие того, что приемно-усилительная электроника любой временной аэроэлектроразведочной системы обладает ограниченным частотным диапазоном, спектр реально измеренного сигнала представлен дискретным набором гармоник базовой частоты возбуждения. Определив классическим «Frequency-Domain» способом амплитуды и фазы соответствующих гармоник, и применив к полученному набору обратное преобразование Фурье, получаем тот самый измеренный сигнал со всеми его искажениями. На возможность такой частотной обработки и интерпретации указывали авторы Becker et al. (1990), когда оценивали преимущества системы COTRAN.



Рисунок 8. Частотная система с нежестким креплением передатчика относительно приемника EM-4H во время съемки, 2014 г.

В устройстве системы были применены совершенно революционные для того времени идеи. Двухкомпонентный (XZ) приемник регистрировал сигнал отклика не только во время паузы, но и во время действия возбуждающего импульса.

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Для изучения верхней части разреза одновременно с традиционным TD на данный момент предложены два решения:

- наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляется короткий малоамплитудный дополнительный импульс (SkyTEM, MultiPulse) (рис. 9, 10);
- наряду с длинным и мощным основным импульсом добавляются высокочастотные сигналы (ЭКВАТОР) (рис. 11, 12).



Рисунок 9. Комбинированная система SkyTEM.

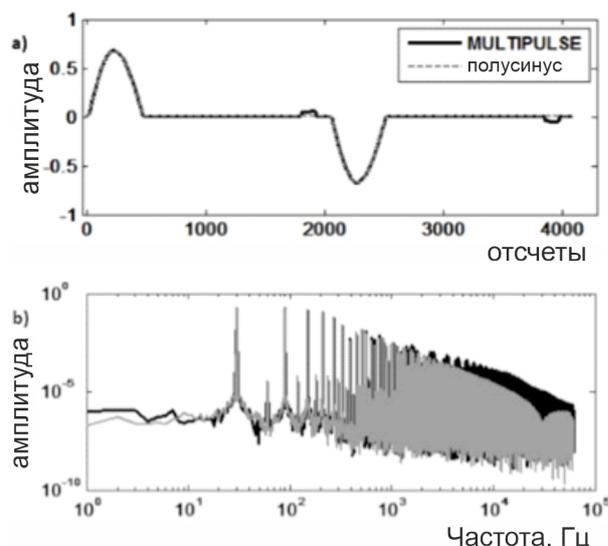


Рисунок 10. (а) форма сигнала для системы MULTIPULSE и полусинуса, (б) их спектры. Длительность полусинуса составляет 4 мс, пиковый момент 700 000 Ам².

Смешанная форма первичного сигнала, который изображен на рис. 11, и непрерывные измерения позволили эффективно обрабатывать данные в частотной области (Volkovitsky and Karshakov, 2013).

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Для корректной обработки вторичного поля на фоне изменяющегося первичного необходимо с очень высокой точностью (уровня 1 ppm) контролировать взаимное расположение передатчика и приемника. Это можно пытаться

достичь физически, создавая жесткие конструкции систем. Есть также вариант алгоритмического контроля. В этом случае используются дополнительные источники, которые излучают сигналы собственных фиксированных частот (Pavlov et al., 2010.). Измерения этих сигналов используются и для определения геометрических параметров системы передатчик-приемник, и для моделирования поля носителя в случае установки передатчика на фюзеляже.

Дело в том, что даже прецизионные вычисления в дифференциальном режиме спутниковой навигационной системы не могут обеспечить необходимой точности взаимного позиционирования передатчика и приемника.

Помимо задач компенсации влияния первичного поля определение взаимного расположения передающей и измерительной систем полезно при интерпретации. Так, методики обработки данных до недавних пор не учитывали изменений в координатах приемника (Collet, 1986; Green and Lane, 2003). Повышение уровня чувствительности аппаратуры потребовало решения данной проблемы. Этим во многом определяется большая популярность систем совмещенной геометрии передатчика и приемника. Альтернатива же фиксированной геометрии — определение координат приемника по показаниям самой электроразведочной системы, т. е. по измерениям поля передатчика (Smith, 2001, Волковицкий, 2012).

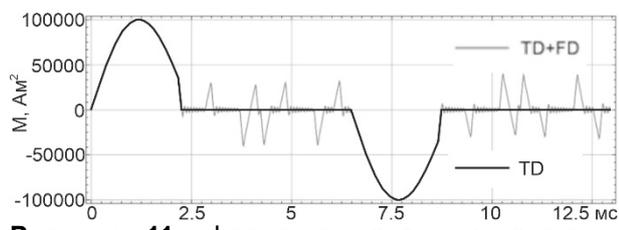


Рисунок 11. форма сигнала для системы ЭКВАТОР (TD+FD) и обрезанного полусинуса (TD).

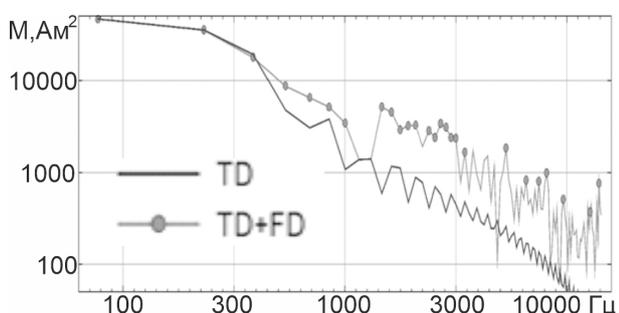


Рисунок 12. Спектры для системы ЭКВАТОР и обрезанного полусинуса.

ОБРАБОТКА В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

В девяностых годах двадцатого века предприняты первые попытки по использованию обработки данных в частотной области для исключения влияния различных аппаратурных шумов (Lane et al., 1998). Схожие графы обработки используются в некоторых современных системах для получения высококачественных данных на ранних временах (Macnae and Baron-Hay, 2010).

В «Frequency-Domain» системах требуется узкополосная фильтрация и синхронное детектирование для каждой из рабочих частот. Взаимное же преобразование значений комплексных амплитуд сигналов B и dB/dt в частотной системе не сопровождается увеличением шума. Эти величины на каждой из частот связаны выражением (Парселл, 1983):

$$dB/dt = -i\omega B.$$

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Методы решения обратных задач геофизики, основанные на детерминированном подходе, изложены, в книгах М.Н. Бердичевского, А.А. Кауфмана, М.С. Жданова (Zhdanov, 2002; Бердичевский и Дмитриев, 2009; Kaufman et al., 2014). Основы стохастического подхода к их решению содержатся в труде А. Тарантолы (Tarantola, 2005). Теория решения линейных задач оценивания методами калмановской фильтрации и сглаживания изложена, например, в книгах В.В. Александрова и др. (2005) и Д. Саймона (Simon, 2006). Применение итерационного обобщенного фильтра Калмана для решения нелинейных задач описан в статьях (Havlik and Straka, 2015; Karshakov, 2018).

В аэроэлектроразведке даже при небольшом объеме исследований необходимо решить обратную задачу на значительном множестве зондирований. Например, при исследовании небольшой площади (5 000 пог. км) получение данных занимает несколько недель. По результатам обработки необходимо найти решение для примерно одного миллиона зондирований. Можно использовать традиционные методы Гаусса-Ньютона, однако они могут занять достаточно много времени. На этапе предварительной интерпретации применяются скоростные автоматизированные решения обратной задачи аэроэлектроразведки, такой как итерационный обобщенный фильтр Калмана.

Интерпретация может выполняться как для данных во временной области, так и для данных в частотной области. В случае, когда данные получены в обеих формах представления, появляется возможность комбинировать

обработку. Это позволяет объединить преимущества двух методов, получая высокую чувствительность к глубинным проводникам при сохранении детальности в верхней части разреза и высокого разрешения в высокоомных областях.

На рис. 13 представлен разрез кажущихся сопротивлений, построенный только по временным данным аэроэлектроразведочной съемки Руанды в 2017 г. На рис. 14 представлен результат 1D комбинированной инверсии данных. В приповерхностной области в левой части разреза был пропущен проводник. В то же время глубинный проводник справа хорошо виден даже на разрезе кажущихся сопротивлений.

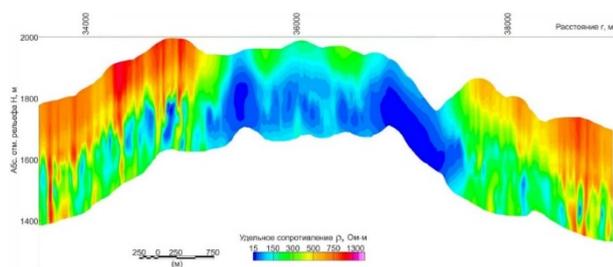


Рисунок 13. Разрез кажущихся сопротивлений, построенный только по временным данным.

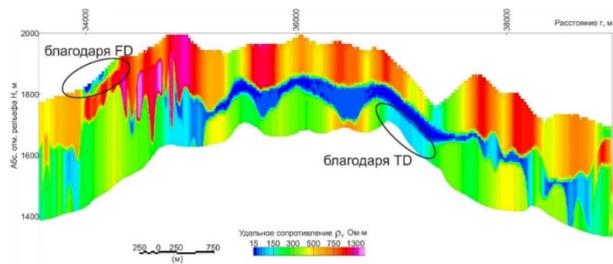


Рисунок 14. Результат комбинированной (и временной, и частотной) инверсии данных.

Выводы

Основным инструментом современной аэроэлектроразведки являются системы МПП, в подавляющем большинстве которых никак не используется информация об откликах, приходящих прямо во время импульса возбуждения. Это позволяет исключить из рассмотрения вопрос о поле наведенных в фюзеляже и в других элементах конструкции токов. Однако в большинстве случаев ВЧР остается слабоизученной.

Комбинированные системы позволяют изучать глубинные проводники, а также выявлять цели в верхней части разреза.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность:

Е.В. Каршакову, А.К. Волковицкому, Б.В. Павлову за постоянное внимание к работе; В.М. Керцману, Ю.Г. Подмогову, М.В. Корбакову за ценные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- Александров, В.В., Болтянский, В.Г., Лемак, С.С., Парусников, Н.А., Тихомиров, В.М., 2005, Оптимальное управление движением: М.: ФИЗМАТЛИТ, 376 с.
- Бердичевский, М.Н., Дмитриев, В.И., 2009, Модели и методы магнитотеллурики: Научный мир, М., 680 стр.
- Волковицкий, А.К., 2012, Структура и алгоритмы бортовых электромагнитных систем относительного позиционирования: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.13.01, 115 с.
- Парселл, Э., 1983, Электричество и магнетизм: учебное руководство: пер. с англ. под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга, М.: Наука, 415 с.
- Человечков, А.И., Ратушняк, А.Н., Байдилов, С.В., Астафьев, П.Ф., 2012, Аэроэлектроразведка при поисках месторождений проводящих руд: Екатеринбург: РИО УрО РАН, 72 с.
- Becker, A., Barringer, A.R., Annan, A.P., 1990, Airborne electromagnetics 1978---1988: in Developments and Application of Modern Airborne Electromagnetic Surveys, D.V. Fitterman (ed.). United States Geological Survey Bulletin, Vol. 1925, pp. 9---20.
- Chen, T., Hodges, G., Christensen, A.N., Lemieux, J., 2014, Multipulse Airborne TEM Technology and Test Results Over Oil-sands: 76th EAGE Conference, Amsterdam, 2014, 4. pp., DOI: 10.3997/2214-4609.20140607.
- Collett, L.S., 1986. Development of the airborne electromagnetic techniques, in Airborne Resistivity Mapping. Geological Survey of Canada Paper, Vol. 86, pp. 9---18.
- Fountain D., 1998. Airborne electromagnetic systems -- 50 years of development. Exploration Geophysics, Vol. 29, No. 1---2, pp. 1---11.
- Prikhodko, A., Bagrianski, A., Kuzmin, P., 2020, Capabilities of the Airborne MobileMT for the Expansion of Active and Historical Mines: FastTIMES EEGS, Vol. 25, 4, pp. 107-113.
- Green, A., Lane, R., 2003. Estimating Noise Levels in AEM Data: in: 16th Geophysical Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, 5 p.
- Havlik, J., Straka, O., 2015. Performance evaluation of iterated extended Kalman filter with variable step-length. Journal of Physics, Conference Series, Vol. 659, pp. 012---022.
- Hodges G., 2013. The power of frequency domain: When you should be using it. Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa, p. 5.

- Karshakov E.V., 2018. Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion. Extended Abstracts of the 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics AEM, Kolding, Denmark, p. 4.
- Kaufman A.A., 1989. A paradox in geoelectromagnetism, and its resolution, demonstrating the equivalence of frequency and transient domain methods. *Geoexploration*, pp. 287---317.
- Kaufman A.A., Alekseev D.A., Oristaglio M., 2014. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, Vol. 45, Elsevier.
- Lane R., Plunkett C., Price A., Green A., Hu Y., 1998. Streamed data, A source of insight and improvement for time domain airborne EM. *Exploration Geophysics*, Vol. 29, pp. 16---23.
- Legault, J., 2015. Airborne Electromagnetic Systems - State of the Art and Future Directions: *CSEG Recorder*, 40(6), P. 38-49.
- Lo, B., and P. Kuzmin, 2008, Z-TEM (airborne AFMAG) as applied to hydrocarbon prospecting: Presented at the 5th International Conference on Airborne Electromagnetics, AEM, p. 4.
- Macnae J., Baron-Hay S., 2010. Reprocessing strategy to obtain quantitative early time data from historic VTEM surveys. *Proceedings of ASEG*, p. 4.
- Palacky, G.J., West, G.F., 2008. Airborne Electromagnetic Methods: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2, Applications. Ed. M.N. Nabighian, P. 811-880
- Pavlov B.V., Volkovitsky A.K., Karshakov E.V., 2010. Low Frequency Electromagnetic System of Relative Navigation and Orientation. *Gyroscopy and Navigation*, Vol. 1, No. 3, pp. 201---208.
- Simon D., 2006. Optimal State Estimation. Kalman, H^∞ and Nonlinear Approaches. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.
- Smith R.S., 2001. On removing the primary field from fixed-wing time-domain airborne electromagnetic data: some consequences for quantitative modelling, estimating bird position and detecting perfect conductors. *Geophysical Prospecting*, Vol. 49, pp. 405---416.
- Smith, R., 2014, Electromagnetic Induction Methods in Mining Geophysics from 2008 to 2012: *Survey Geophysics*, 35, P. 123-156
- Sorensen K.I., Mai S., Mohr K.R. and Nyboe N.S., 2013. Development of High Dipole TDEM Systems: in: *Proceedings of AEM*, Mpumalanga, South Africa, 2 p.
- Sorensen K.I., 2018. The Developments in Helicopter TEM: in: *proceedings of AEM*, Kolding, Denmark, 2018, 2 p.
- Tarantola, A., 2005, *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*: SIAM, 358 p.
- Volkovitsky A., Karshakov E., 2013. Airborne EM systems variety: What is the difference? Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa, p. 4.
- Zhdanov, M.S., 2002, *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems*: Elsevier Science B.V., 635 p.

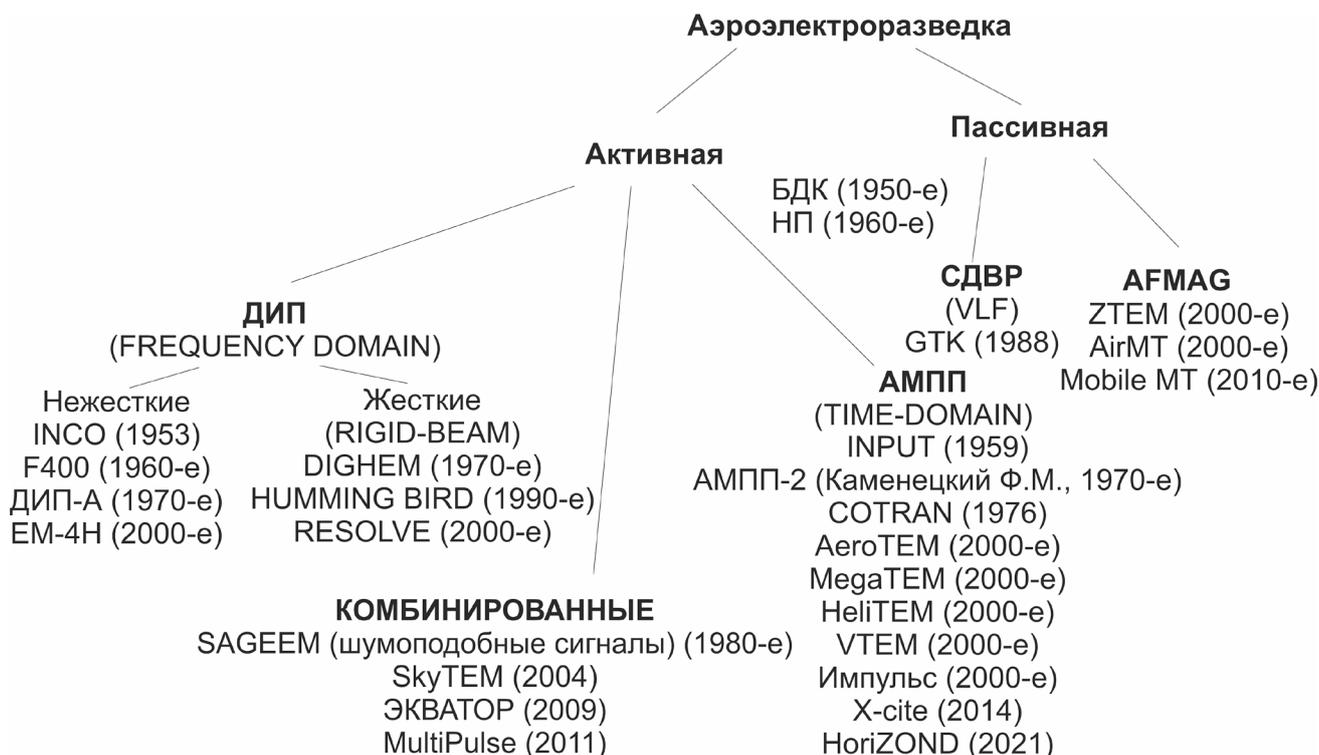


Рисунок 15. Классификация основных типов аэроэлектроразведочных систем.